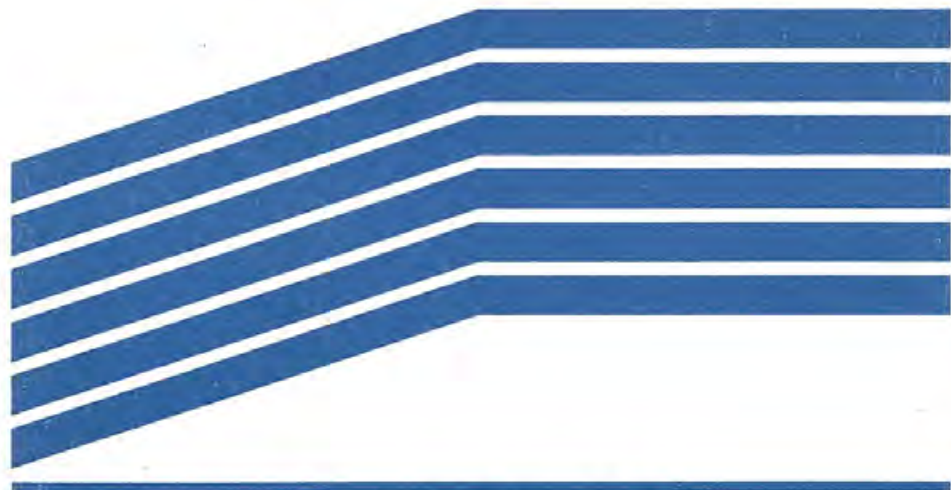


Г.И. Газалеева

**МЕТОДЫ
УЛУЧШЕНИЯ
КАЧЕСТВА
АСБЕСТА**



Екатеринбург. 2005

Г 12

Газалеева Г. И.

Г 12 **Методы улучшения качества асбеста:** Научное издание. Екатеринбург: Изд-во УГТУ, 2005. 148 с.
ISBN 5-8019-0063-2

Книга содержит краткий обзор свойств хризотил-асбеста, методов и схем его обогащения, методик оценки качества руды и товарного асбеста. Впервые описана адсорбция тонкодисперсной фракции на асбестовом волокне и даны классификация, описание и теоретические основы некоторых методов снижения содержания тонкодисперсной фракции в асбесте. Приведены принципы и практика технологического управления качеством товарного асбеста на российских и зарубежных асбестообогащительных фабриках. Дано описание технологии использования асбеста у потребителей.

Для горных инженеров-обогащителей асбестообогащительных фабрик, студентов специальности 090300 – «Обогащение полезных ископаемых», а также для студентов горно-металлургических техникумов и специалистов, связанных с потреблением асбеста.

Рис. 51. Табл. 10. Библ. 83 назв.

Рецензенты: зав. кафедрой обогащения полезных ископаемых Уральского государственного горного университета, профессор, доктор техн. наук В. З. Козин;
заместитель генерального директора по асбесту ОАО «Ураласбест» В. А. Кочелаев

Печатается по решению НТС ОАО «Ураласбест» и кафедры обогащения полезных ископаемых УГТУ

ВВЕДЕНИЕ

Качество готовой продукции в условиях рыночной экономики является наиболее важным показателем для успешной производственной и торговой деятельности предприятий.

Под готовой продукцией горно-обогащительных комбинатов подразумевается концентрат обогащительных или агломерационных фабрик, пригодный для дальнейшего использования в металлургическом и химическом производстве или строительстве. Часто готовая продукция горного производства – это не конечная продукция в обычном понимании, но полуфабрикат.

В асбестовой промышленности готовой продукцией считается асбест различных товарных групп и марок, называемый товарным асбестом. Товарный асбест является сырьем при производстве асбестоцементных, асбестотекстильных, фрикционных или других изделий.

Для улучшения качества товарного асбеста разрабатываются организационно-технические мероприятия, внедряются новые обогащительные аппараты и технологические схемы [1]. Перечисленные меры оказываются действенными тогда, когда учитываются природные свойства полезного ископаемого, физические явления, происходящие при его обогащении, и требования потребителей.

Ранее отдельной классификации методов и схем по улучшению качества готовой продукции как для асбеста, так и для других полезных ископаемых не было.

Необходимость создания специальных схем по улучшению качества асбеста обусловлена усилением конкурентной борьбы и антиасбестовой кампанией, усилившейся в последние годы.

Отличительной особенностью асбеста как готовой продукции является наличие в нем большого количества адсорбированной тонкодисперсной фракции крупностью менее 0,075 мм.

Тонкодисперсная фракция, как показали исследования [2], в основном состоит из мелких породных частиц, которые адсорбировались на поверхности асбестового волокна. Природа сил адсорбции применительно к асбесту не изучена. Благодаря адсорбции тонкодисперсной фракции на асбестовом волокне в процессе добычи, дробления, транспортировки и обогащения асбестовой руды происходит значительный прирост товарного асбеста. Химический состав тонкодисперсной фракции одинаков с асбестовым волокном, многие физические свойства подобны асбестовому волокну. Однако для потребителей высокое содержание тонкодисперсной фракции является нежелательным. Технология получения асбестоцементных и других изделий предполагает определенный оптимальный уровень этого показателя в исходном асбесте, превышение которого приводит к ухудшению качества изделий.

10–15 лет назад средний уровень содержания тонкодисперсной фракции в товарном асбесте российских (советских) предприятий был на 15–20 % выше, чем в товарном асбесте зарубежных фирм. Разработка схем и методов снижения содержания тонкодисперсной фракции в реальных производственных условиях стала одной из важнейших задач для выживания российской асбестовой промышленности.

В настоящей книге приводятся технологические схемы улучшения качества готовой продукции на асбестообогащительных фабриках и оперативные методы управления качеством в процессе производства. Они позволяют снижать содержание тонкодисперсной фракции в товарном асбесте и управлять другими показателями качества готовой продукции.

Оперативное управление качеством готовой продукции подразумевает регулирование технологического процесса, направленное на выработку готовой продукции заданного качества в определенный момент времени. Одной из отличительных особенностей процесса обогащения асбеста является получение в конечных операциях большого ассортимента марок, производство которых требует уделять процессу оперативного технологического управления качеством продукции особое внимание.

Данная книга является первой попыткой разработки теоретических основ и обобщения практики создания и внедрения схем и методов улучшения качества готовой продукции на примере асбестообогащительной фабрики. Некоторые принципы, изложенные в ней, возможно использовать при обогащении других полезных ископаемых. Материалы глав и разделов могут оказать помощь студентам высших учебных заведений и техникумов при изучении проблем обогащения асбеста. Особенностью данной книги является то, что она написана на основании анализа технологии обогащения асбеста в условиях промышленного производства.

1. ПРИРОДНЫЕ СВОЙСТВА ХРИЗОТИЛ–АСБЕСТА

Хризотил–асбест – это волокнистый минерал группы серпентинита, обладающий трубчатым строением элементарного кристалла и уникальными прочностными и термическими свойствами.

В природе кроме жил хризотил–асбеста широко распространены волокнистые жилы минералов – амфиболов, гипса (селенита), галита, кальцита, кварца и многих других. М. Н. Малеевым [3] рассмотрены условия и характер проявления 144 волокнистых минералов. К этому разряду им также отнесен и хризотил–асбест. Элементарные волокна хризотил–асбеста представляют собой трубки (фибриллы) с концентрическим или спиральным расположением слоев. Именно такое строение минерала объясняет многие полезные свойства хризотил–асбеста: низкую электропроводность,

высокую механическую прочность, эластичность, стойкость к воздействию высоких температур и др.

Волокнистые минералы группы амфиболов также называются асбестами. Их состав и свойства отличаются от состава и свойств хризотил–асбеста.

Амфибол–асбесты являются натриево–железистыми гидросиликатами с высоким содержанием окиси алюминия и кремнекислоты. Амфибол–асбесты обладают кислотоустойчивостью, в то время как хризотил–асбест щелочестоек. Наиболее распространены в природных условиях такие амфибол–асбесты, как крокидолит, амозит, антофиллит, тремолит, родусит и актинолит. Ранее амфибол–асбесты широко использовались в тех же отраслях производства, что и хризотил–асбест. В настоящее время использование их прекращено из-за высокой канцерогенности волокна в отличие от хризотил–асбеста, который безопасен при контролируемом использовании. В настоящей книге рассмотрен только хризотил–асбест.

1.1. Генезис и месторождения

Особенности строения хризотил–асбеста обусловлены процессами его образования. К. Г. Башта [4] считает, что наиболее важным фактором при образовании хризотил–асбеста является «жильный фактор».

«Существо месторождений хризотил–асбеста заключено в проявлении жильной формы волокнистой разновидности серпентинита – хризотила. Нет жил хризотил–асбеста – нет и месторождения». Знание условий и механизмов формирования жил хризотил–асбеста является ключом к пониманию генезиса его месторождений, а также ключом к пониманию и осуществлению процессов дальнейшей переработки руды хризотил–асбеста.

Принципы образования месторождений хризотил–асбеста заключаются в следующем:

- первостепенную генетическую роль в формировании жил хризотил–асбеста играют серпентиниты;
- величина мощности жил хризотил–асбеста зависит от мощности прилегающих серпентинитовых оторочек;
- существует четкая зависимость между характером вмещающих пород и составом жил хризотил–асбеста;
- рост волокон хризотил–асбеста осуществляется на основе синтеза из компонентов, переведенных в раствор, в то время как при образовании других серпентинитов происходят реакции с участием твердой и жидкой фаз;
- обязательным условием образования хризотил–асбеста является наличие микропор и трещин в жилообразующих породах.

Таким образом, материальную основу жильного асбестообразования составляют процессы вещественного перераспределения асбестообразую-

щих компонентов с заполнением трещин содержащимся в породе серпентинитом.

Месторождения хризотил-асбеста промышленного типа в основном связаны с ультраосновными породами, залегающими на контакте с гранитами. По запасам хризотил-асбеста крупнейшим в мире месторождением является Баженовское (Средний Урал). В пределах России расположены и эксплуатируются Кiemбаевское (Оренбургская область) и Актотвракское (Республика Тыва) месторождения хризотил-асбеста. Провинция Квебек в Канаде располагает значительными запасами этого минерала. В настоящее время там разрабатываются два месторождения - «Джеффри Майнс» и «Блэк Лейк». Китай имеет 11 месторождений хризотил-асбеста, наиболее перспективными из которых являются «Манья» и «Аксай». Они представляют собой один геологический массив с Джетыгаринским месторождением, расположенным в Казахстане. В Республике Зимбабве, королевстве Свазиленд и Бразилии находятся еще ряд крупных месторождений хризотил-асбеста. Более мелкие имеются в Италии, Греции, Югославии.

В России разведано несколько месторождений хризотил-асбеста, обладающих промышленными запасами: Молодежное (Бурятия), Саянское (Красноярский край), Красноуральское (Северный Урал). Наиболее перспективным из них является Молодежное месторождение хризотил-асбеста. Высокое содержание асбеста в руде утвержденных запасов и уникальные свойства асбестового волокна - длина и прочность - выделяют его из ряда других.

При образовании жил хризотил-асбеста на исходную породу одновременно воздействует значительное количество разнообразных факторов: температура, давление, присутствие только жидкой фазы в трещине, величина и характер трещин и т. д. Дополнительными являются условия, позволяющие образовывать «двухэтажную» кристаллическую решетку асбестового волокна, что в природе встречается крайне редко. Этим объясняется ограниченное распространение месторождений хризотил-асбеста на Земле.

1.2. Химический состав и структура

Хризотил-асбест является магниезиальным гидросиликатом. Среднее соотношение окислов при этом составляет: 39-45 %, SiO_2 - 40-43 %, H_2O - 12-13 %, Fe_2O_3 - 0,6-4,6 %, (табл. 1.1).

Электронномикроскопическими исследованиями Бадоле, Лагодзинским и Багхи [5] установлено, что волокна хризотил-асбеста в основном являются полыми трубками. Современное представление о структуре хризотил-асбеста базируется на исследованиях В. Нолла, Х. Кирхера, Т. Бейтса, Е. Уитакера, Б. Б. Звягина и др. Представления о структуре и свойствах хризотил-асбеста рассмотрены В. Д. Перлиным [6]. Трубчатая струк-

Таблица 1.1

Химический состав природного хризотил-асбеста, %

Окислы	Баженово		Джетыгара	Киембай	Аспагаш	Канада (Тетфорд)	США (Аризона)	Южная Африка
	асбест нормальной прочности	асбест ломкий						
SiO_2	42,10	41,70	44,41	44,69	42,01	39,62	41,56	41,15
MgO	41,99	37,62	39,33	39,86	40,63	39,73	42,05	40,76
Al_2O_3	0,53	0,95	0,84	0,3	0,28	0,81	1,27	0,58
Fe_2O_3	1,30	1,76	1,88	1,54	0,60	4,62		1,45
FeO	0,24	2,34	0,49	0,42	0,05	1,90	0,64	0,96
CaO	Следы	2,45	Следы	Следы	0,77	Следы		
$\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$	То же	Следы	То же	То же	Следы			
H_2O^*	12,99	12,99	12,03	12,10	12,02	13,32	12,92	13,11
H_2O^{**}	1,42	1,42	0,80	0,70	1,63	0,43	1,39	0,92

* Конституционная вода.

** Адсорбционная вода

тура минерала, как было упомянуто выше, обусловлена его «двухэтажным» строением: внешней тетраэдрической сеткой кристаллов и внутренней – октаэдрической. Несоответствие в размерах тетраэдрической и октаэдрической сеток приводит к возникновению кривизны слоя и в конечном итоге к образованию полых или заполненных межфибрилярным веществом трубок. По данным электронномикроскопического изучения, фибриллы имеют внутренний диаметр в среднем 5–7 нм, внешний – 15–65 нм. Фибриллы имеют высокую степень параллельности. Однако не все они являются полыми трубками. Меж- и внутрифибрилярное пространство элементарных волокон часто заполнено аморфным веществом, близким по плотности к кристаллической части фибрилл. Такая структура волокна хризотил–асбеста обуславливает следующие его свойства:

Плотность, кг/м ³	2400–2600
Твердость по шкале Мооса	2–3
Температура плавления, °С	1450–1500
Теплопроводность, Вт/(м·°С)	0,001
Удельное сопротивление, Ом·м	10 ⁶
Прочность при разрыве, МПа, в т. ч.:	
недеформированное волокно вдоль по волокнистости	2400–3170
поперек	0,03
деформированное волокно вдоль по волокнистости	1600–2000
распушенное волокно	600–800
Модуль упругости, ГПа	50–170
Относительное удлинение, %	1–2
Термостойкость (потеря конституционной воды и прочности), °С	
при длительном постоянном нагреве	500
при кратковременном нагреве	700
Показатель преломления	1,53–1,57

Хризотил–асбест также характеризуется низкой кислото- и высокой щелочестойкостью.

Диэлектрическая проницаемость при ориентации электрического поля перпендикулярно оси волокна – 7,8–16 ед. [6].

Механическая прочность асбестового волокна на растяжение выше прочности всех известных синтетических волокон и сопоставима с прочностью стальной металлической проволоки.

1.3. Методы определения природных свойств

Значительный разброс прочности на разрыв асбестового волокна связан с наличием в пределах одного месторождения различных его типов. Согласно исследованиям М. В. Соболевой [7], В. А. Зырянова [8], по прочности хризотил–асбест подразделяется на 4 типа – нормальной прочности,

продольно- и косоволокнистый, ломкий и выветрелый. Присутствие каждого из этих типов в асбестовой руде, поступающей на асбестообогачительные фабрики, в значительной степени влияет на технологические показатели ее переработки и на конечное качество готовой продукции – асбеста товарных групп и марок.

Для определения природных свойств асбестов, а именно принадлежности к той или иной природной прочностной разности, используется ряд физико-химических методов. Во-первых, это *термический метод нагревания асбестового волокна* с выделением слабосвязанной воды и получением эндо- и экзоэффектов на дифференциальных кривых нагревания (ДТА и ДТГ). Параметры кривых ДТА и ДТГ при сопоставлении с эталонными позволяют делать заключение о принадлежности асбеста к тому или иному природному виду. Кроме того, по этим кривым возможно определить наличие той или иной примеси. Для более точного определения вида асбеста используется *ИК-спектроскопический анализ*, по которому определяют также и наличие примесей. ИК-спектр поглощения изучаемого асбеста сравнивают с эталонным. Важными показателями при отнесении асбеста к тому или иному виду являются *электрокинетический потенциал* асбеста, определяемый на установке электроосмоса, и потери при прокаливании [9]. Малоизвестным, но достаточно показательным для определения вида асбеста является метод замеров *лозарифмического декремента затухания*, основанный на способности хризотил–асбеста различных видов сохранять состояние твердого тела в водной суспензии [10]. Кроме того, при исследовании асбестов различных месторождений применяются электронный микроскоп, прибор Скотта для прямого определения прочности волокон, установка по измерению магнитной восприимчивости образца. Заключение принадлежности хризотил–асбеста к тому или иному виду составляется по совокупности вышеприведенных методов.

1.4. Физико-химические показатели хризотил–асбеста

Для хризотил–асбеста *нормальной прочности* характерны следующие физико-химические и физико-механические показатели:

1. Волокна асбеста окрашиваются водным раствором хлор-цинк-йода в интенсивно бурый цвет.

2. На ИК-спектре поглощения, как правило, фиксируются хорошо разрешенные три пика с последовательно убывающими интенсивностями – ~950, ~1020 и ~1070 см⁻¹ валентных колебаний иона [SiO₄]⁴⁻ кристаллической решетки минерала.

3. По данным термического анализа (рис. 1.1,а), на кривых ДТА отмечается эндоэффект разрушения кристаллической решетки с максимумом около 700 °С в узком температурном интервале, с высотой экзоэффекта с максимумом около 800 °С от 3 до 8 мм, с содержанием слабосвязанной во-

ды от 0,8 до 1,4 %, с наличием температурного интервала ΔT , проявившегося в виде горизонтальной площадки, отделяющего эндоэффект от экзоэффекта.

4. Массовая доля потерь при прокаливании определена в интервале от 13,78 до 14,36 %.

5. Агрегативная прочность волокна высокая, наименьшее значение логарифмического декремента затухания водной суспензии асбеста составляет 0,04-0,07; водная суспензия асбеста достигает состояния твердого тела, которое сохраняется в течение 19-29 мин.

6. Электрокинетический потенциал определен в интервале от +23,1 до +29,8 мВ.

Несколько иными физико-химическими и физико-механическими показателями характеризуется **ломкий хризотил-асбест**:

1. Волокна ломкого хризотил-асбеста не окрашиваются водным раствором хлор-цинк-йода.

2. Для ломкого хризотил-асбеста типичным является следующий ИК-спектр поглощения: в области валентных колебаний иона $[\text{SiO}_4]^{4-}$ кристаллической решетки проявляется один хорошо разрешенный пик - ($\sim 950 \text{ см}^{-1}$) и три слабо интенсивных мало разрешенных пика - (~ 1070 , ~ 1020 и $\sim 1035 \text{ см}^{-1}$).

3. По данным термического анализа (рис. 1.1,б), на кривой ДТА отмечается осложненный эндоэффект с максимумом около 740°C и перегибом на низкотемпературной ветви эндоэффекта при 720°C , отсутствие температурного интервала ΔT , отделяющего эндоэффект с максимумом около 700°C от экзоэффекта с максимумом около 800°C , на ДТА фиксируется эндоэффект с максимумом около 875°C , при наличии кальцита.

4. Массовая доля потерь при прокаливании ломкого асбеста составляет около 13 %.

5. Агрегативная прочность волокна низкая, наименьшее значение логарифмического декремента затухания водной суспензии асбеста - около 0,27-0,37, т. е. суспензия не достигает состояния твердого тела. Электрокинетический потенциал ломкого асбеста определен как нулевой или отрицательный.

Продольно-волокнистый хризотил-асбест по физико-химическим и физико-механическим показателям также отличается от нормального.

1. Волокна продольно-волокнистого асбеста окрашиваются водным раствором хлор-цинк-йода в интенсивно красно-коричневый цвет.

2. ИК-спектры поглощения образцов подобны ИК-спектру поглощения хризотил-асбеста нормальной прочности.

3. По данным термического анализа (рис. 1.3,в), на термограммах отмечается уменьшение интенсивности пика эндоэффекта с максимумом около 700°C и увеличение пика экзоэффекта с максимумом около 800°C , уменьшение температурного интервала ΔT в виде появления наклонной

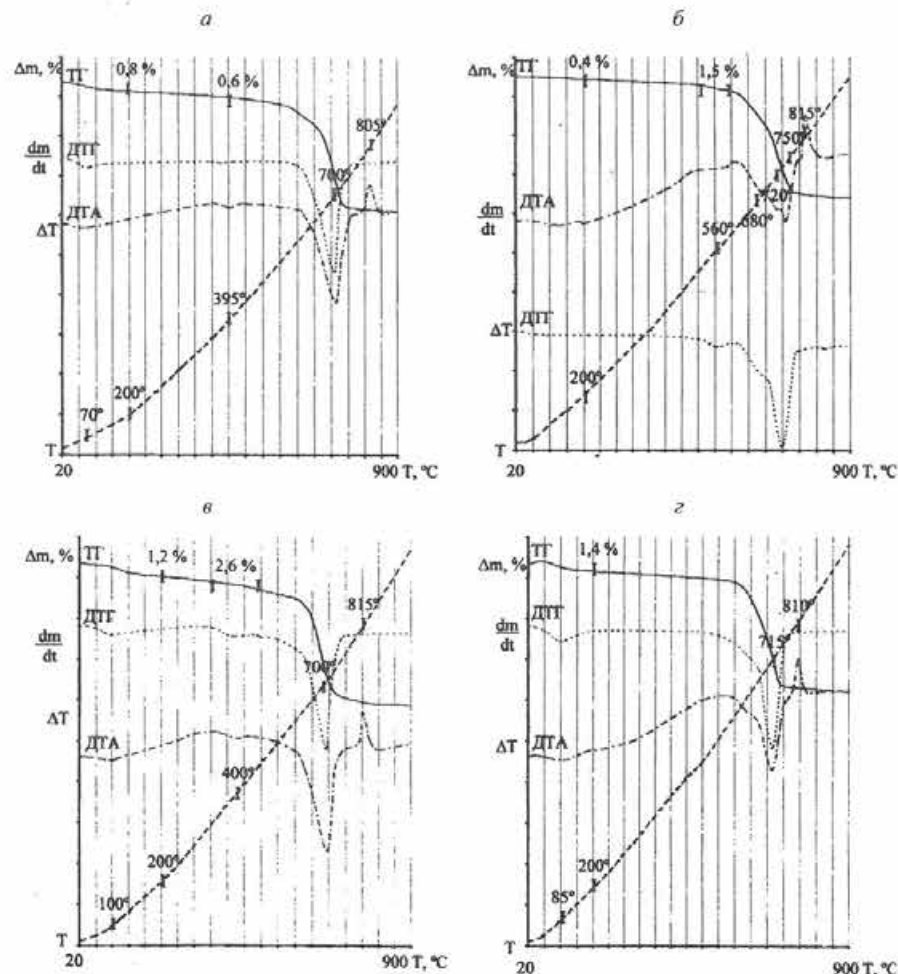


Рис. 1.1. Термограммы хризотил-асбеста нормальной прочности (а), ломкого (б), продольно-волокнистого (в), выветрелого (г):

Δm - относительное изменение массы, %;

$\frac{dm}{dt}$ - скорость разложения образца, 0,4 мг/мин;

ΔT - разница температур в образце и эталоне, прогревом до 1000°C , $^\circ\text{C}$;

T - температура, $^\circ\text{C}$

площадки, высокое содержание слабосвязанной воды (2,7 и 3,6 %), наличие тесно сросшегося с асбестом немалита (2,6 и 3,9 %).

4. Доля потерь массы при прокаливании увеличена по сравнению с потерями асбеста нормальной прочности и составляет около 14,7 и 14,9 %.

5. Агрегативная прочность волокна высокая, логарифмический декремент затухания составляет около 0,07-0,06, но время сохранения состояния твердого тела мало и составляет около 16 мин.

6. Электрокинетический потенциал продольно-волокнистого асбеста соответственно равен +15,2 – +20,4 мВ.

Для выветрелого хризотил-асбеста характерны следующие физико-химические и физико-механические показатели:

1. Распушенные волокна асбеста окрашиваются водным раствором хлор-цинк-йода неоднородно.

2. На ИК-спектрах поглощения фиксируются три пика в области колебаний связи атомов Si-O в интервале волновых чисел 950-1100 см⁻¹, которые могут иметь хорошее разрешение или слабое, особенно в максимумах ~1070 и ~1020 см⁻¹.

3. На термограммах асбеста (рис. 1.4,з) отмечается интенсивный эндозффект разрушения кристаллической решетки в узком температурном интервале с невысоким экзозффектом при 800 °С от 6 до 12 мм, уменьшение температурного интервала АТ, наличие слабосвязанной воды от 1,3 до 1,8 %.

4. Массовая доля потерь при прокаливании составляет 13,1–14,7 %.

5. Агрегативная прочность выветрелого асбеста высокая, водная суспензия асбеста достигает состояния твердого тела, наименьшее значение логарифмического декремента затухания водной суспензии асбеста равно 0,14–0,06; время сохранения состояния твердого тела составляет 12 мин.

6. Электрокинетический потенциал характеризует степень выветривания асбеста и показывает, что при переходе от нормального асбеста к выветрелому происходит смена знака электрокинетического потенциала с +4,8 до –4,1 мВ.

Вышеприведенные данные получены на чистых разновидностях основных прочностных типов волокна хризотил-асбеста. В условиях разрабатываемых месторождений часто встречается смесь одного или нескольких природных типов. Доля того или иного природного типа в отдельных месторождениях и залежах также может быть разной. Изменить ее невозможно, так как она обусловлена генезисом месторождения. Однако возможно управлять данным показателем при составлении композиции руды, поступающей из горного передела на асбестообогатительную фабрику. Технология обогащения хризотил-асбеста зависит от природных свойств асбестового волокна, а также от контрастности асбестового волокна и вмещающей породы. Для хризотил-асбеста наибольшая контрастность волокна и поро-

ды определена по показателям плотности и скорости витания частиц в воздушной среде.

1.5. Резюме

Природные свойства хризотил-асбеста обусловлены генетическими особенностями образования минерала. Волокнистая структура хризотил-асбеста определяет его основные свойства: низкую электропроводность, высокую механическую прочность, эластичность, стойкость к воздействию высоких температур и др. По результатам изучения природных свойств хризотил-асбеста можно сделать следующие выводы.

1. Материальную основу жильного асбестообразования составляют процессы вещественного перераспределения асбестообразующих компонентов между серпентинитом, содержащимся в породе, и трещинами.

2. Хризотил-асбест является магнезиальным гидросиликатом и имеет трубчатое строение волокон – фибрилл.

3. Имеется четыре прочностных типа хризотил-асбеста – нормальной прочности, продольно- и косоволокнистый асбест, ломкий и выветрелый. Присутствие каждого из этих типов в асбестовой руде, поступающей на асбестообогатительные фабрики, в значительной степени влияет на технологические показатели ее переработки и на конечное качество готовой продукции – асбеста товарных групп и марок.

4. Основные месторождения хризотил-асбеста расположены в России, Канаде, Бразилии, Зимбабве, Китае, Казахстане.

2. ТЕХНОЛОГИЯ ОБОГАЩЕНИЯ АСБЕСТОВЫХ РУД

По данным Оливера Боулза, российский асбест впервые упоминается в 1250 г. [11]. Однако промышленное освоение месторождений асбеста в России началось с открытия Софроном Согры в 1720 году Невьянского месторождения асбеста на Среднем Урале. Намного позже, в XIX веке, возник так называемый русский метод обогащения асбеста на наклонных плоскостях. Этот метод основан на различии коэффициентов трения и упругости свободного асбестового волокна, зерен сростков и пустой породы. Для осуществления данного метода в 1901–1907 годах на рудниках купчихи Кремлевой и барона Ж. Де Сукантонна (Баженовское месторождение) применяли для дробления руды бегуны на конной тяге, затем для обогащения асбеста – наклонные плоскости и для сортировки волокна по длине – бураты – примитивные барабанные классификаторы. Основным недостатком данного метода была низкая его производительность, позволяющая перерабатывать руду только с очень высоким содержанием асбеста (более 20 %).

Параллельно русскому методу в Канаде было предложено обогащать асбест с помощью воздуха. Данный метод был назван канадским. Все последующее развитие мировой асбестообогатительной отрасли основано на использовании канадского метода воздушного обогащения асбеста.

2.1. Метод обогащения асбеста

Основным методом обогащения асбеста является сухой гравитационный метод, основанный на принципе отсасывания асбестового волокна из дробленой руды.

В настоящее время аппаратом, реализующим этот метод, является грохот с отсасыванием (рис. 2.1). Составными элементами данной на рисунке обогатительной системы являются:

- непосредственно грохот (1), классифицирующий исходный продукт на надрешетный и подрешетный;
- сопло (2), установленное в конце сетчатой поверхности грохота, которое служит для забора «всплывшего» свободного асбестового волокна;
- воздушный циклон (3), в котором осаждается основное количество асбестового волокна;
- вентилятор или система вентиляции (4), создающая разрежение под воздухоприемником.

Обязательными элементами системы также являются очистные установки, в которые поступает запыленный воздух после вентилятора.

Процесс обогащения асбеста на грохоте с отсасыванием осуществляется следующим образом:

- Под действием колебательных движений грохота, по которому движется смесь свободного асбестового волокна, пустой породы и сростков, происходит «всплытие» асбеста. В нижнем слое концентрируются зерна породы и сростки.
- Асбестовое волокно извлекается воздухом с помощью воздухоприемника (сопла) и транспортируется в циклон.
- Зерна пустой породы и сростки классифицируются по крупности в процессе грохочения и поступают либо в следующую стадию обогащения, либо в отвал.

Физический признак, используемый при обогащении асбеста, – различная скорость витания асбестового волокна и породы. Оптимальное извлечение асбеста происходит при условии, если скорость воздуха в воздухоприемнике больше скорости витания асбеста и меньше скорости витания породы.

Существует несколько формул для определения скорости витания частиц в воздухе. Их вид зависит от физических свойств транспортируемого материала и свойств воздушного потока.

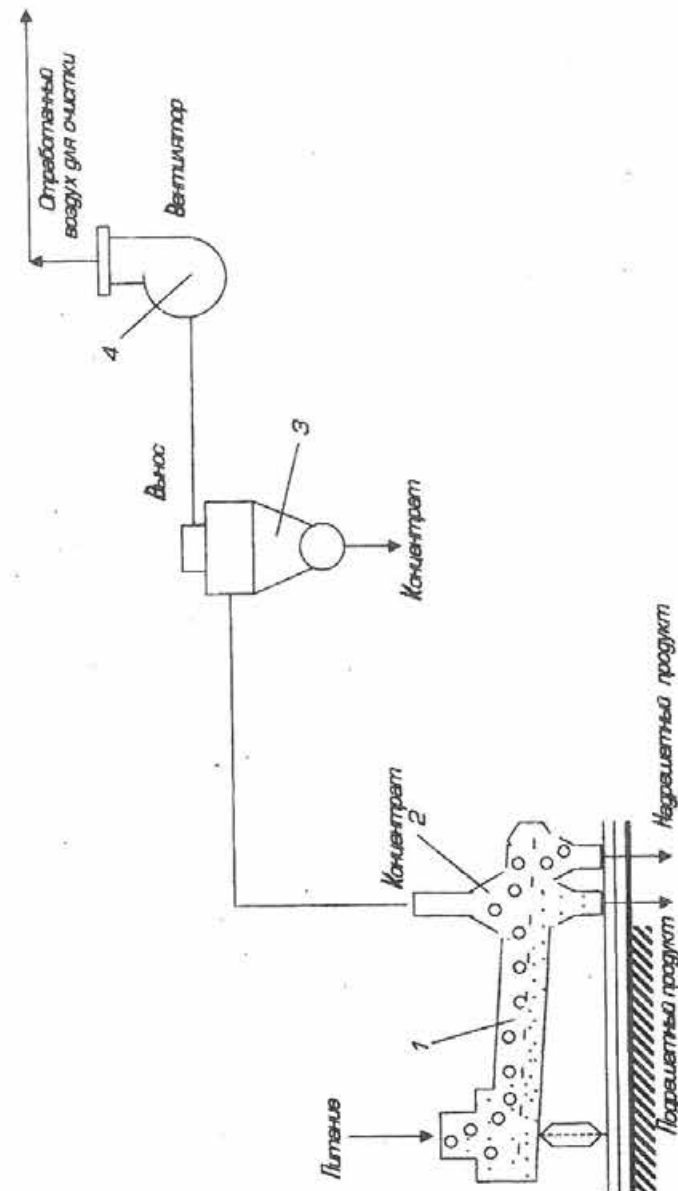


Рис. 2.1. Принципиальная схема обогащения асбеста на грохоте с отсасыванием

Классической формулой скорости витания для однородного материала шаровой формы является зависимость Блесса:

$$v = 5,8 \sqrt{\frac{d\rho_m}{\rho_v}}, \quad (2.1)$$

где d – диаметр частицы, м; ρ_m и ρ_v – плотность материала и воздуха, кг/м³.

Г. В. Жуковский [12] для асбестовых частиц предложил формулу

$$v = 3\sqrt{\rho_m d_3}, \quad (2.2)$$

где d_3 – эквивалентный размеру частицы диаметр шара. Определение эквивалентного диаметра производится по формуле

$$d_3 = \sqrt[3]{\frac{W}{\pi}}, \quad (2.3)$$

где W – объем частицы, м³.

Для асбеста, волокна которого имеют цилиндрическую форму, объем частицы можно вычислить следующим образом:

$$W = \frac{\pi d^2}{4} L, \quad (2.4)$$

а значит, эквивалентный диаметр следует рассчитывать по формуле

$$d_3 = \sqrt[3]{\frac{6d^2 L}{4}}. \quad (2.5)$$

Однако было доказано [14], что формула (2.5) противоречит опытными данным, которые показывают, что d_3 для асбеста не зависит от длины. Характеристикой формы частицы является коэффициент воздушного сопротивления ψ , зависящий от параметра Рейнольдса Re , состояния поверхности и положения ее в пространстве. Re определяется величиной скорости воздушного потока.

В общем виде скорость витания определяется по формуле

$$v = C\sqrt{\gamma d}, \quad (2.6)$$

где C – постоянный коэффициент, зависящий от коэффициента ψ ; γ – удельный вес материала; d – диаметр зерна (волокна).

Согласно исследованиям В. А. Шалюгиной и Г. С. Бергера [13], коэффициент формы для хризотил-асбеста составляет 3,9.

2.2. Асбестообогащительные фабрики

Внедрение канадского метода обогащения асбеста в России началось в 30-е годы XX в. Причиной послужило значительное расширение производства и снижение содержания асбеста в перерабатываемой руде. В 1930 г. была введена в эксплуатацию асбестообогащительная фабрика № 2 комбината «Ураласбест», в 1935-м – фабрика № 3, в 1955-м – фабрика № 5, в 1956–1961 гг. – фабрика № 4, в 1969-м – фабрика № 6. Все фабрики перерабатывали руду Баженовского месторождения хризотил-асбеста.

В 1964 г. началось промышленное освоение Актювракского месторождения хризотил-асбеста и была пущена 1-я очередь обогащительной фабрики Тувинского горно-обогащительного асбестового комбината, 2-я очередь обогащительной фабрики комбината начала работу в 1976 г. В 1965 г. и 1974–1975 гг. были введены в эксплуатацию 1, 2 и 3-я очереди обогащительной фабрики горно-обогащительного асбестового комбината «Кустанайасбест», которая начала перерабатывать руду хризотил-асбеста Джетыгаринского месторождения (Казахстан). В 1979 г. было завершено строительство обогащительной фабрики горно-обогащительного асбестового комбината «Оренбургасбест». Рудной базой этого комбината является Киембаевское месторождение хризотил-асбеста. В настоящее время из перечисленных выше предприятий работают фабрики № 4 и № 6 ОАО «Ураласбест», которые объединены в единую асбестообогащительную фабрику. Фабрика № 6 является участком № 1, а фабрика № 4 – участком № 2. Также работают 2-я очередь асбофабрики комбината «Кустанайасбест» и комбинат «Оренбургасбест».

В 1930–1960-е годы построены также почти все зарубежные асбестообогащительные фабрики, а именно асбофабрика «Баланжеро» (Италия), греческая асбестообогащительная фабрика, фабрики рудников «Кэссиер», «Нормандия Майнс», «Бритиш Канадиен», «Кэри Канадиен», «Блэк Лейк» и «Джонс Менвил» в Канаде, асбестообогащительные фабрики Бразилии, Свазилендская и Южноафриканские асбестообогащительные фабрики, асбестообогащительная фабрика в Республике Зимбабве. В настоящее время производят асбест только предприятия Зимбабве, Бразилии и Канады. Причем из канадских предприятий остались два – компании «Джонс Менвил» (Джеффри) и ЛАБ (перерабатывает руду месторождений «Блэк Лейк» и «Кэрри»).

В то время как во всем мире, в том числе и в России, происходит снижение выпуска асбеста из-за усиления антиасбестовой компании, Китай наращивает темпы роста асбестовой промышленности. За последние 7–8 лет китайские асбестообогащительные фабрики из малопроизводительных предприятий, на которых в основном использовались ручные способы обогащения, превратились в механизированные производства. Наиболее развитыми из них являются асбестообогащительные фабрики горных рудников «Манья», «Аксай» и «Нога», которые в настоящее время объединились в единый горно-обогащительный комплекс. Схемы обогащения асбеста на данных предприятиях также основаны на использовании канадского метода обогащения.

Технологические схемы перечисленных предприятий отличаются друг от друга типами и мощностями применяемого оборудования, компоновочными и схемными решениями, глубиной обогащения и качеством выпускаемой продукции. Однако принцип обогащения с помощью отсасы-

вания асбестового волокна из дробленых продуктов и структура технологических схем всех мировых асбестообогащительных фабрик одинаковы.

Структуры схем обогащения асбеста всех современных фабрик состоят из трех переделов – дробильно-сортировочного комплекса (ДСК); рудного потока; перечистного потока.

2.3. Дробильно-сортировочный комплекс (ДСК)

Дробильно-сортировочным комплексом (ДСК) называется производство по подготовке руды по крупности к последующему процессу обогащения. Характерной особенностью ДСК асбестообогащительной фабрики является наличие в схеме операции сушки 40–50 % всей дробленой руды. Цель данной операции – подготовить руду к процессу воздушного обогащения.

Примером типичной схемы ДСК асбестообогащительной фабрики является схема 1-й очереди комбината «Кустанайасбест» (Казахстан), изображенная на рис. 2.2. Схема включает три стадии дробления, грохочение до и после 3-й стадии дробления и сушку подрешетных продуктов последней операции грохочения в шахтных сушильных печах.

Недостатками данной схемы являются:

- использование конусных дробилок, в которых не осуществляется принцип избирательности дробления;
- отсутствие грохочения перед второй стадией дробления;
- отсутствие замкнутых циклов с целью обеспечения стабильной крупности сухой руды для питания рудного потока;
- неэффективный способ сушки;
- использование малоэффективных грохотов ПГ (прутковых) в операциях предварительного грохочения;
- отсутствие узла предварительного обогащения.

Современная схема ДСК участка № 1 асбестообогащительной фабрики ОАО «Ураласбест» (бывшей фабрики № 6) во многом повторяет схему ДСК 1-й очереди комбината «Кустанайасбест», хотя для стабилизации крупности конечного продукта имеет четыре стадии дробления и включает узел предварительного выделения крупной пустой породы в виде щебня фракций 40–80 или 25–60 мм (рис. 2.3).

Наиболее эффективной на сегодняшний день схемой ДСК асбестообогащительной фабрики является схема канадского предприятия «Джеффри-6» (рис. 2.4). Основные положения ее следующие:

- 5 стадий дробления, 5-я стадия осуществляется в дробилках ВМД и фактически является 1-й стадией рудного потока;
- использование во всех стадиях дробления дробилок ударного действия «Хаземаг-АРК-60», обеспечение избирательности дробления;

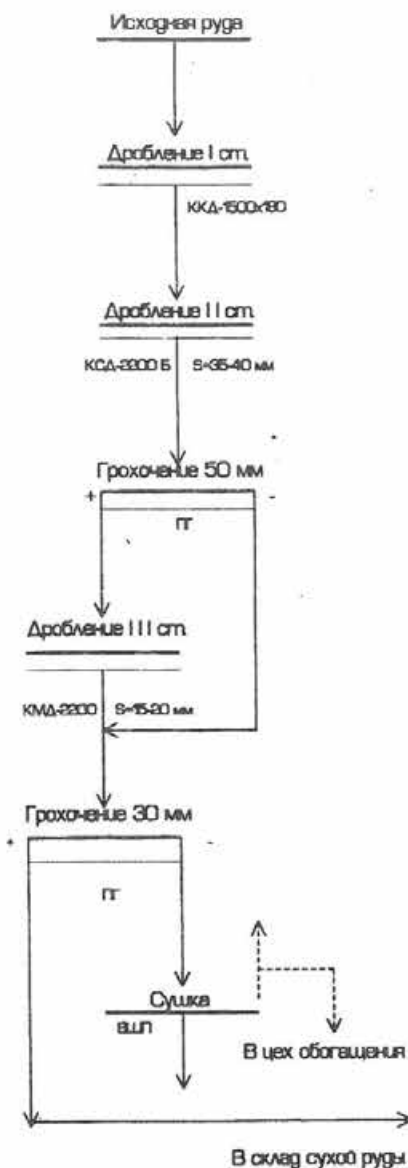


Рис. 2.2. Схема ДСК фабрики №1 комбината «Кустанайасбест»

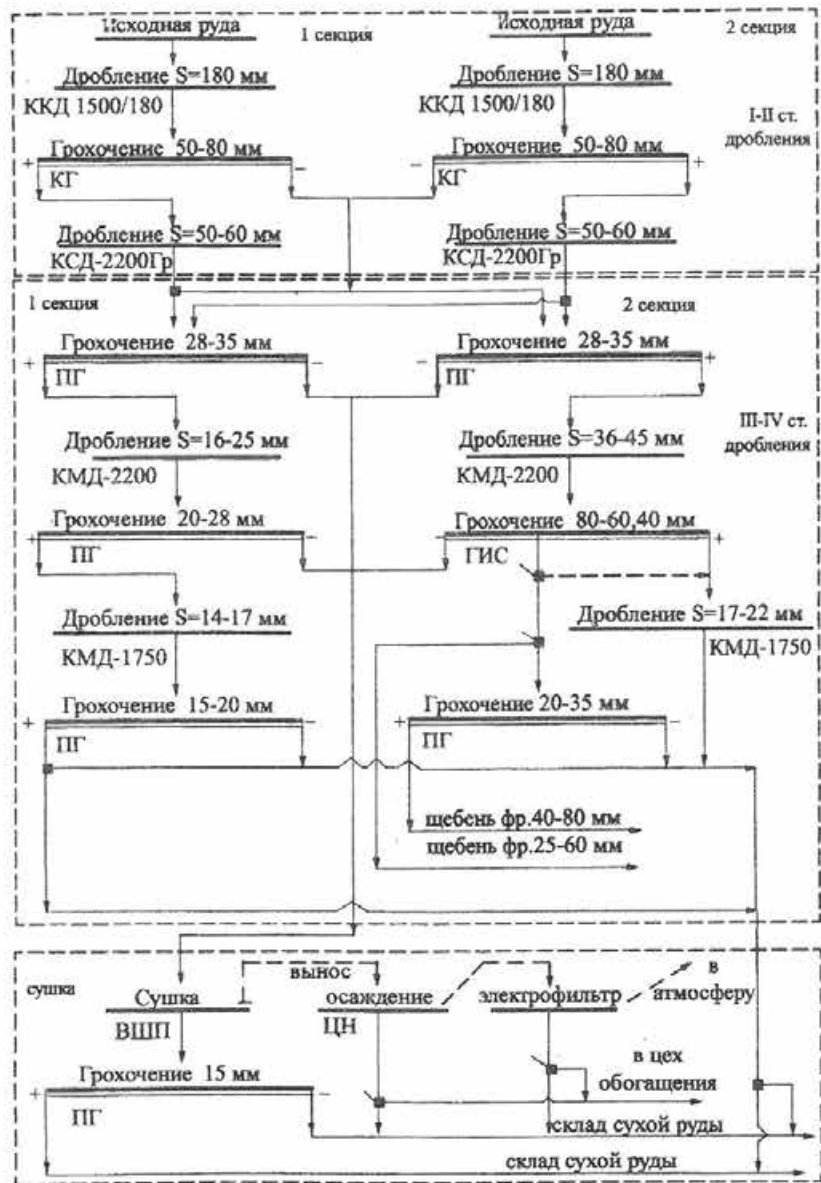


Рис. 2.3. Схема ДСК-1 асбофабрики ОАО «Ураласбест»

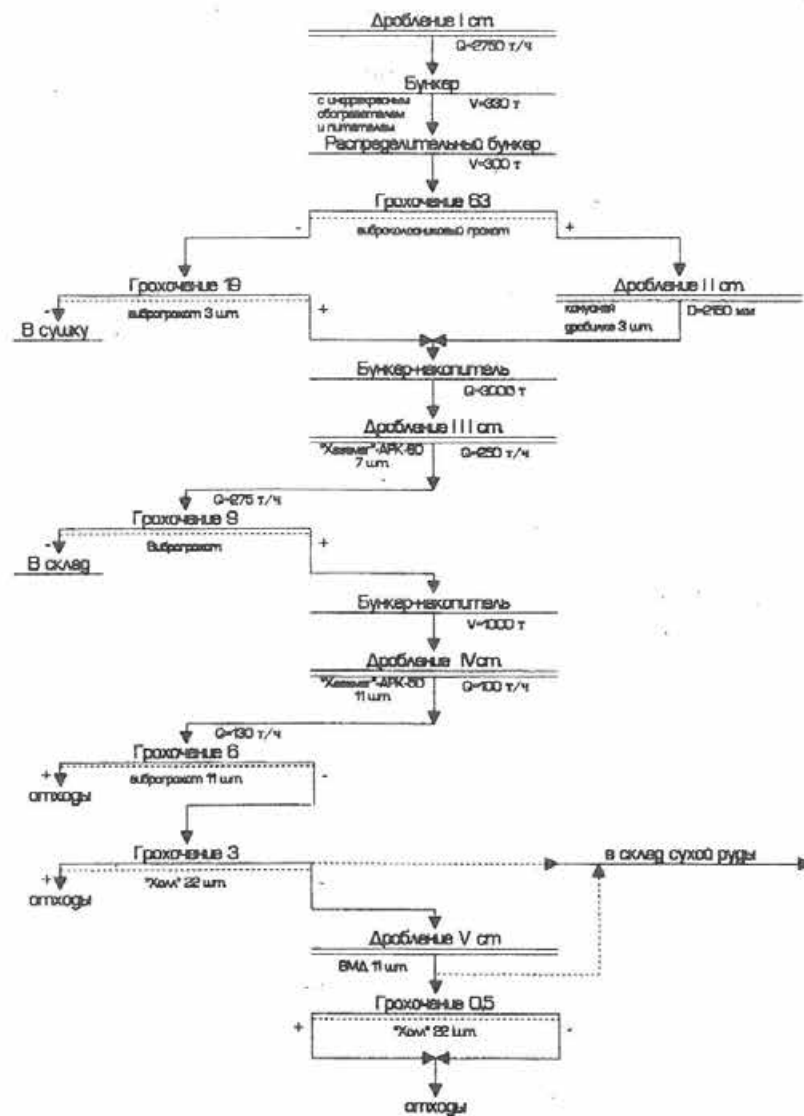


Рис. 2.4. Схема ДСК фабрики «Джеффри-6»

– использование высокоэффективных виброгрохотов для операций предварительного и контрольного грохочения с выводом в отвал крупных фракций отходов в трех точках;

– перенесение двух стадий обогатительных операций грохочения с отсасыванием из передела рудного потока и выделение асбестового волокна на ранних стадиях, исключая транспортировку его с рудой, а значит загрязнение породными частицами и, в особенности, тонкодисперсной фракцией;

– дозирование и усреднение перед каждой операцией дробления в бункерах–накопителях.

Схема ДСК фабрики «Джеффри–6» учитывает почти все недостатки предыдущих схем. Исключение составляет отсутствие замкнутого цикла. Кроме того, схема на «Джеффри–6» осуществляется прогрессивным методом с использованием кипящего слоя. Перенесение операций обогащения в ДСК неслучайно и свидетельствует о прогрессивной тенденции в целом в обогатительной отрасли.

2.4. Рудный поток

Рудным потоком при обогащении асбеста называется узел стадийного дробления в ударных дробилках и стадийного обогащения воздушным способом исходной сухой руды после ДСК. Количество стадий может составлять от 2 до 5. В рудном потоке обычно используются вертикальные молотковые дробилки (ВМД) и грохоты с отсасыванием. Грохот является классифицирующим аппаратом, при использовании двух сит он выделяет в подрешетный продукт нижнего сита отвальные хвосты. Кроме того, с грохота с помощью воздуха извлекается черновой концентрат. Остальные продукты классификации – это промежуточные продукты, которые дробятся в следующей стадии дробления с целью доизвлечения скрытого более мелкого асбестового волокна. Важной особенностью рудного потока является набор размеров сит, используемых от стадии к стадии, т. е. шкала классификации. Также важными являются скоростные режимы работы ударных дробилок. Аналогом рудного потока в схемах обогащения других полезных ископаемых являются узлы измельчения с промежуточной классификацией и стадийным извлечением крупнозернистого полезного минерала между стадиями измельчения. К таким узлам можно отнести выделение самородного золота в гидроциклонах между первой и второй стадиями измельчения в схемах обогащения руд, например Березовского месторождения Среднего Урала.

Первоначальные типичные схемы рудного потока российских (советских) асбестообогатительных фабрик имели 5 стадий дробления. Обычно первая стадия осуществлялась в конусной дробилке мелкого дробления, последующие три – в молотковых дробилках и последняя – в кулач-

ковых дробилках, дезинтеграторах или стержневых мельницах. Отсасывание асбестового волокна производилось в один прием после каждой стадии. При этом отсутствовала какая-либо система в подборе размеров сит на грохотах рудного потока. Для грохочения с отсасыванием применялись либо плоскокачающиеся грохоты, либо грохоты кругового действия.

В 70-е годы XX в. началось полное техническое перевооружение асбестовой промышленности России. Повсеместно стали внедряться грохоты инерционного действия (ГИД) и вертикальные молотковые дробилки (авторы Н. В. Дябин и Л. Я. Смирнова [14]). Резкое улучшение технологических показателей обусловлено применением в рудном потоке узкой шкалы классификации. Узкая шкала классификации рудного потока с извлечением черновых концентратов из каждого класса крупности была внедрена впервые на 2-й секции фабрики № 2 комбината «Ураласбест». Данная схема приведена на рис. 2.5. Опробование схемы в сравнении со старым вариантом, проведенное ВНИИПроктасбестом [15], показало, что применение узкой шкалы классификации значительно, в 1,42–1,47 раза, улучшает качество черновых концентратов и увеличивает показатель извлечения асбестового волокна в данном переделе до 85–95 % против 65–75 % по схемам без применения узкой шкалы классификации.

В дальнейшем во всех схемах новых асбестообогатительных фабрик и при реконструкции старых в рудном потоке используется узкая шкала классификации.

Наиболее прогрессивная современная схема рудного потока российской асбестообогатительной фабрики – это схема участка № 1 ОАО «Ураласбест» (рис. 2.6). Ее основными признаками являются:

- узкая шкала классификации;
- три стадии дробления в вертикальных молотковых дробилках с увеличением скорости вращения ротора от стадии к стадии (рис. 2.7);
- выделение отвальных хвостов класса менее 0,5 мм во всех стадиях извлечения;
- использование для извлечения свободного асбестового волокна высокопроизводительных грохотов с отсасыванием – ГИД–2000;
- выделение крупных отвальных хвостов в виде щебней фракций – 20–40 и 5–20 мм;
- выделение в качестве мелких отвальных хвостов щебеночно-песчаной смеси (ПЩС) и крупного песка или крупнозернистой посыпки для мягкой кровли;
- гибкость схемы получения щебней и ПЩС с выработкой нескольких их разновидностей в зависимости от запросов потребителей. Всего схема позволяет получать 4 вида щебня, 3 вида ПЩС и 3 вида песка или посыпки. В перспективе возможен переход на безотходное производство в рудном потоке.

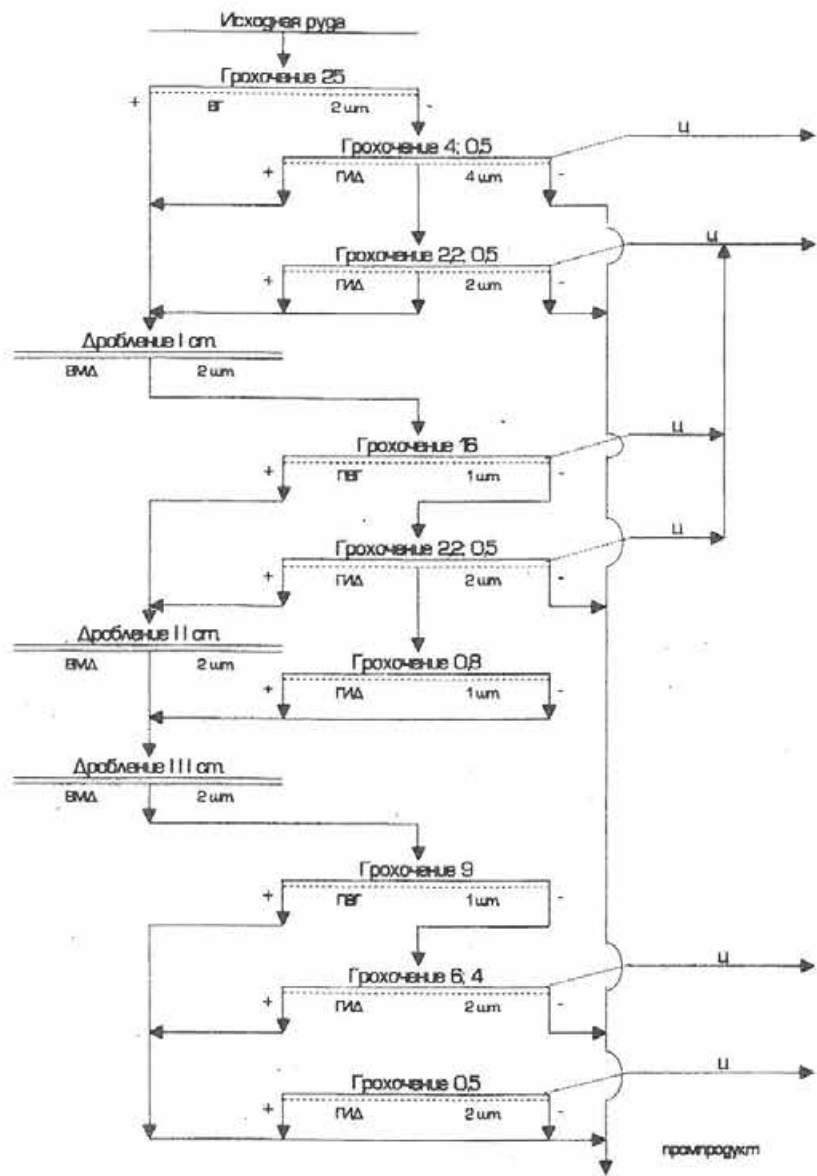


Рис. 2.5. Технологическая схема рудного потока II секции фабрики № 2 комбината «Уралсбест»

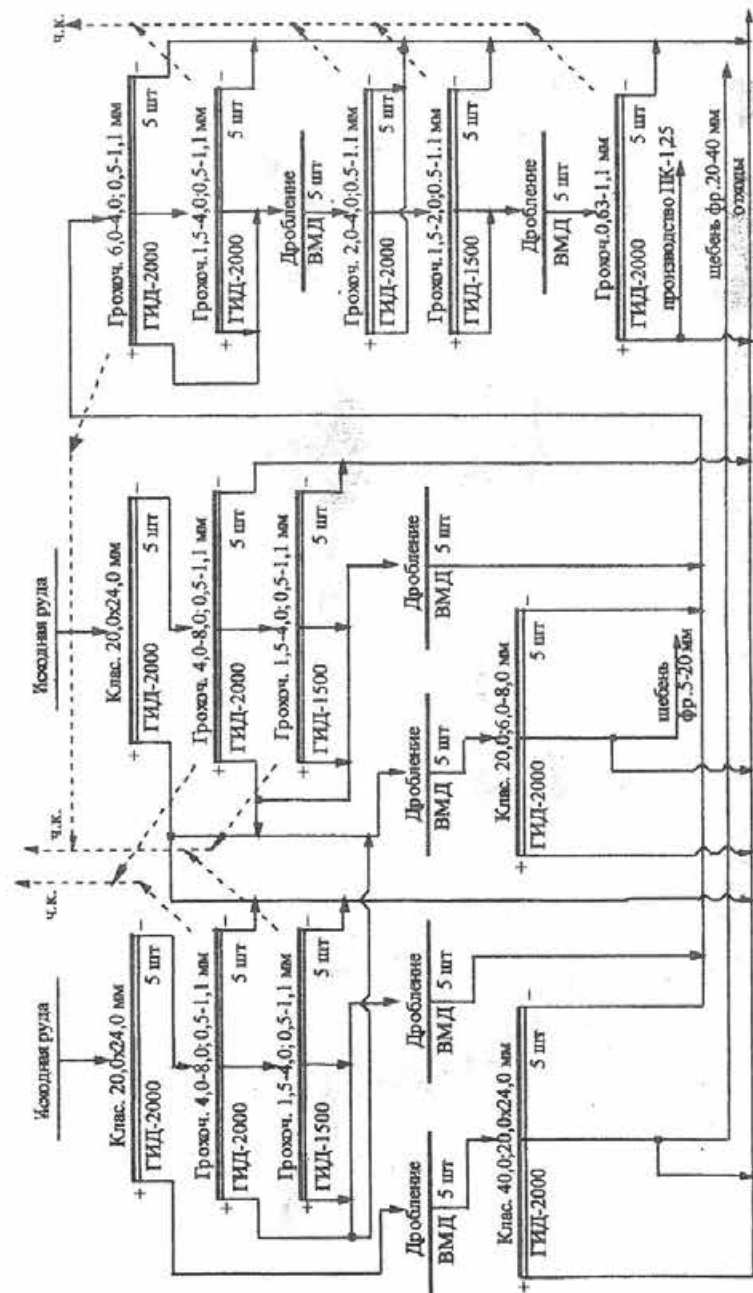


Рис. 2.6. Схема рудного потока ЦО-1 асбофабрики ОАО «Уралсбест»

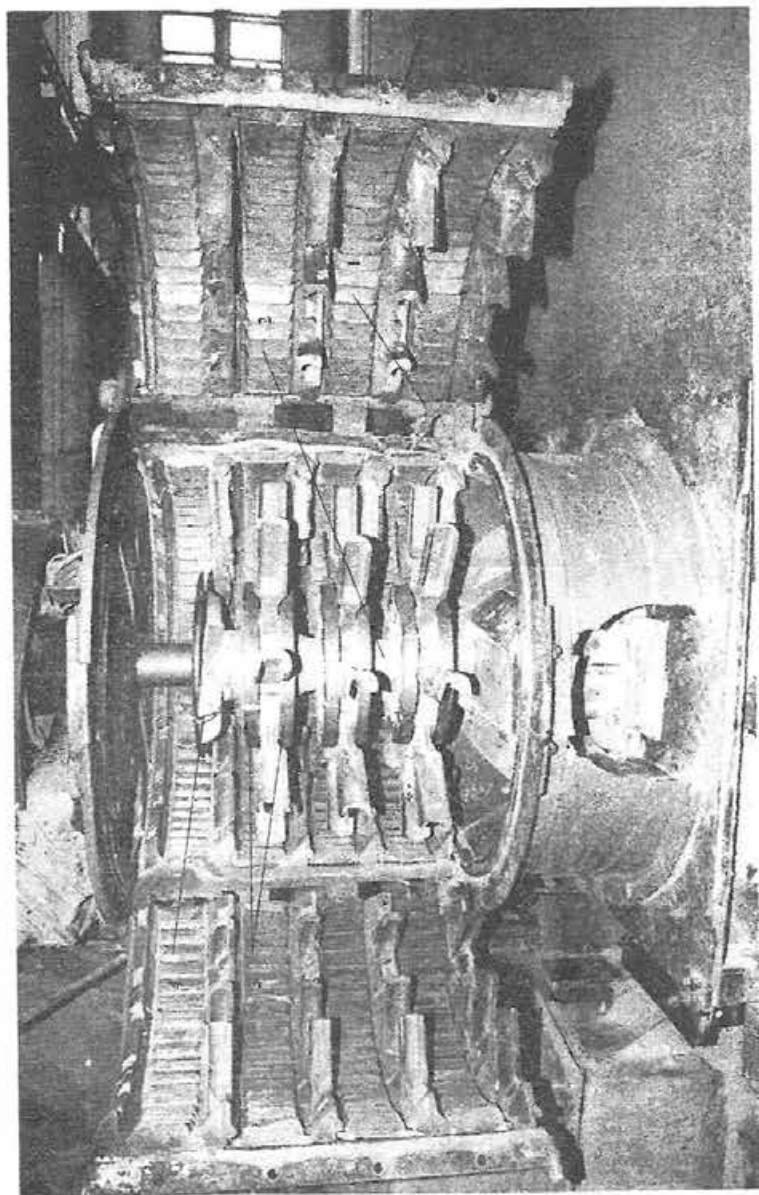


Рис. 2.7. Вертикальный молотковый дробилка:
1 – корпус, 2 – ротор, 3 – диск, 4 – молоток

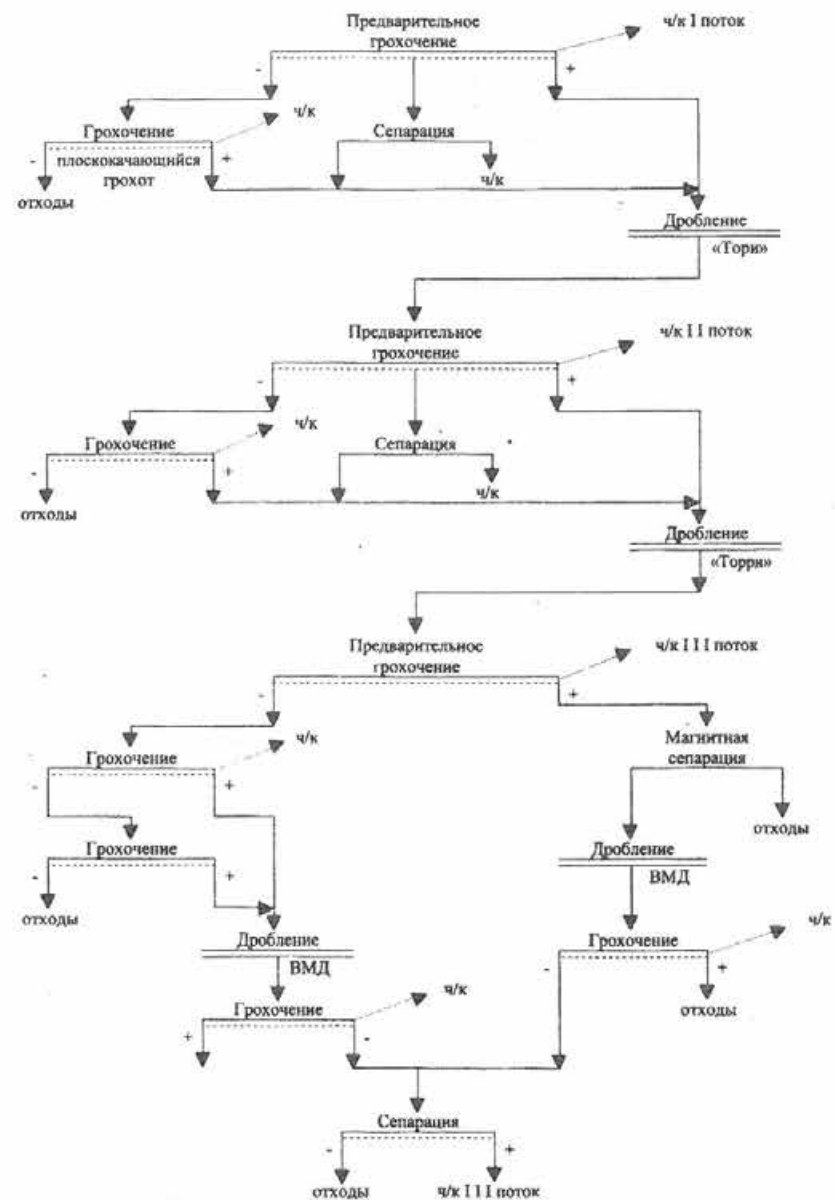


Рис. 2.8. Схема рудного потока фабрики «Джеффри-5»

Основным недостатком данной схемы рудного потока является то, что она не позволяет получать черновые концентраты стабильного качества и рассчитана на разубоженную исходную руду с низким содержанием асбеста. Кроме того, извлечение асбеста в черновой концентрат по этой схеме низкое. На рис. 2.8 изображена схема рудного потока канадской фабрики «Джеффри – 5». Характерными для данной схемы являются обязательная операция предварительного грохочения перед каждой стадией дробления, операция сепарации по доизвлечению волокна из надрешетного продукта грохотов с отсасыванием в каждой стадии, использование магнитной сепарации для очистки отходов от сростков породы с асбестовым волокном в целях повышения извлечения асбеста. Схема, так же, как и предыдущая, имеет большое число точек вывода отвальных хвостов. Из источников не известно, используют ли в Канаде эти хвосты как готовые инертные материалы, однако принципиальная возможность этого не исключена.

Все схемы рудного потока различных асбестообогащительных фабрик предназначены для получения черновых концентратов. Обычно черновые концентраты объединяются в три потока. Четвертый поток формируется чаще всего из черновых концентратов узла измельчения.

Узел обработки промпродуктов рудного потока практически дублирует одну или несколько стадий рудного потока при усилении ее режимов.

2.5. Перечистный поток

Перечистный поток при обогащении асбеста предназначен для классификации и очистки черновых концентратов от крупных породных частиц – гали ($d > 0,4$ мм), мелких породных и волокнистых частиц – пыли ($d < 0,4$ мм) и тонкодисперсной фракции менее $0,075$ мм (200#). Для процесса перечистки черновых асбестовых концентратов наиболее сложной является задача рациональной очистки его от тонкодисперсной фракции. Механическим способом эта задача решается малоэффективно и требует нестандартных подходов.

Поток перечистки черновых концентратов более индивидуален для каждой отдельной асбестообогащительной фабрики, так как он предназначен для доведения продукции до уровня готовых групп и марок асбеста. На каждой обогащительной фабрике получают черновые концентраты различного качества, конечная продукция вырабатывается с соблюдением различных требований. Каждая страна имеет свой национальный стандарт, который обязаны соблюдать производители асбеста. Однако цели, которым служит перечистный поток, для всех предприятий едины: очистка черновых концентратов от гали, пыли и, в особенности, от тонкодисперсной фракции. Кроме того, в перечистном потоке асбестовое волокно черновых концентратов дополнительно классифицируется.

Цепочка аппаратов для перечистки черновых асбестовых концентратов по своей структуре проста. Первая операция осуществляется на грохоте с отсасыванием и предназначена для предварительного обезгаливания и классификации чернового концентрата. Концентрат, полученный в данной операции, проходит несколько стадий очистки в барабанных грохотах, затем подвергается контрольному обезгаливанию на грохотах ГИД или ХОЛЛ и контрольной классификации также в барабанном грохоте. Размеры сит при этом могут меняться в широком диапазоне, как и длина цепочки очистки концентрата предварительного обезгаливания. Обезгаливание обычно осуществляется на грохотах с отсасыванием, за рубежом для этой цели иногда используется воздушный сепаратор, например сепаратор Бауэра в Канаде [16].

Первой модификацией барабанного грохота, примененного в схемах перечистки асбестообогащительных фабрик, была сортовка – наклонный барабанный деревянный или металлический грохот. Вращению в сортовке подвергался только сетчатый барабан. После реконструкции российских предприятий в 70-е годы XX века для очистки и классификации асбестового волокна в перечистном потоке стали использовать асбестовые обеспыливатели АО–61 – более усовершенствованный тип барабанного грохота. Кроме вращения сетчатого барабана в АО–61 вращается и ротор, снабженный различного вида лопатками. При переходе с сортовок на АО–61 эффективность обеспыливания увеличилась с 25 до 40 %. Одновременно с АО–61 в Канаде стали повсеместно использовать для обеспыливания и классификации черновых асбестовых концентратов так называемые канадские обеспыливатели 36" и 54", которые отличаются от АО–61 использованием круговой сетки вместо прямоугольных рамок.

На рис. 2.9 изображена схема перечистного потока I секции ЦО–2 асбестообогащительной фабрики ОАО «Ураласбест». Данная схема позволяет получать асбест текстильных марок, используемых для прядения асбестовой нити и изготовления из нее ткацких изделий. Кроме описанных выше аппаратов ГИД и АО в схеме применяется центробежный пневматический грохот ЦПГ. ЦПГ имеет вертикальное расположение сетчатого барабана и предназначен исключительно для последних стадий классификации в линиях перечистки текстильного асбеста.

Главными недостатками данной схемы перечистки, как и многих других российских схем, является:

- значительное количество промежуточных продуктов и точек их направления;
- отсутствие дозирования черновых концентратов, нестабильность их качества;
- необоснованно длинные цепочки для классификации асбестового волокна;
- отсутствие операций, улучшающих текстуру волокна;

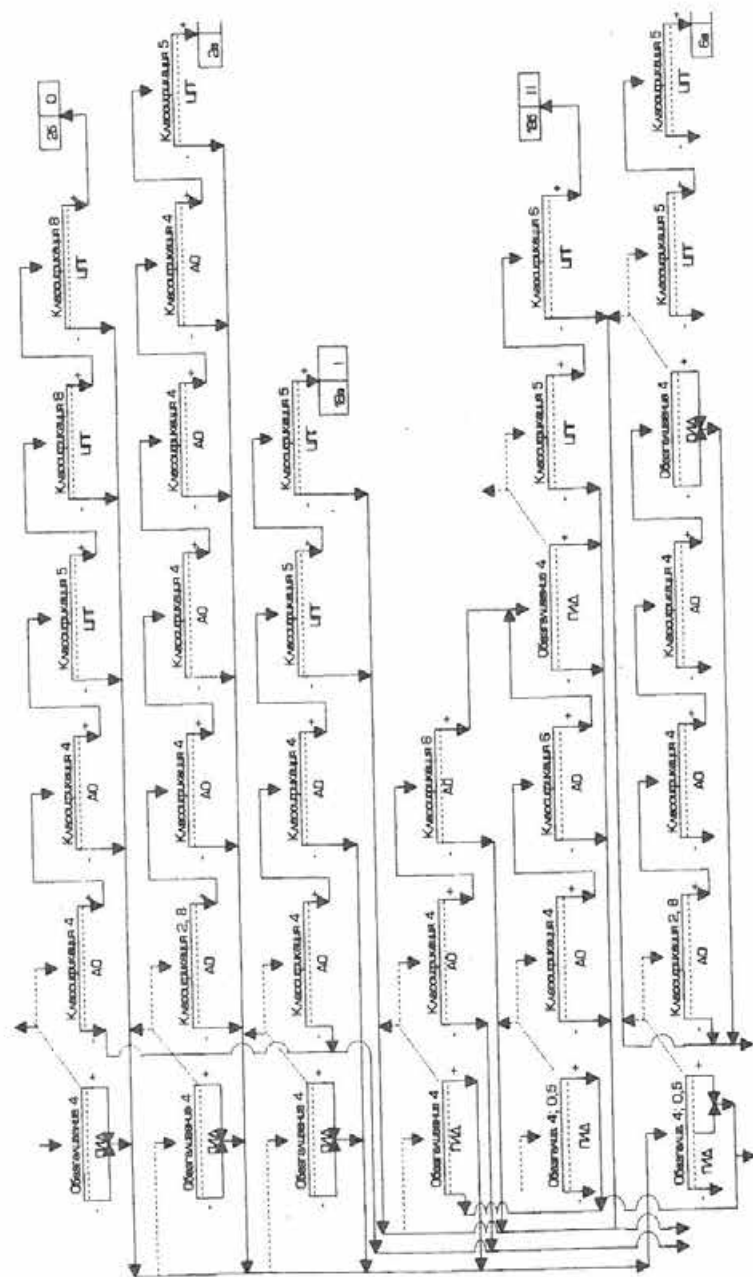


Рис. 2.9. Схема перечистного потока (I секция) цеха обогащения фабрики № 4 комбината «Ураласбест»

– отсутствие технологии и оборудования для стабилизации качества асбеста.

Для получения асбеста трубной и шиферной групп (служат основой для изготовления асбестоцементных труб и шифера) цепочки перечистного потока подобны. Дополнительным их недостатком является низкая эффективность процессов и аппаратов для освобождения асбестового волокна от тонкодисперсной фракции менее 0,075 мм.

Снижение тонкодисперсной фракции в готовой продукции с каждым годом приобретает все большее значение.

Необходимость снижения тонкодисперсной фракции в асбесте обусловлена следующим: изменением мировых требований к качеству асбестоцементных изделий в связи с появлением широкого спектра их заменителей; ужесточением экологических требований ко всем видам производства, в том числе и к производству асбеста и изделий из него. Зарубежные производители стали выработать асбест с пониженным содержанием тонкодисперсной фракции гораздо раньше российских. Основными аппаратами, предназначенными для этих целей, служат также барабанные грохоты. Их особенностью является высокоскоростной режим вращения ротора и использование значительного количества технологического воздуха. На асбестообогатительной фабрике ОАО «Ураласбест» внедрен барабанный грохот (русский вариант), снижающий содержание тонкодисперсной фракции, – это барабанный классификатор БК. Барабанный классификатор является базовым аппаратом, характер воздействия которого на асбестовое волокно внутри сетчатого барабана обеспечивает отделение тонкодисперсной фракции от волокна с использованием воздуха.

Разработка схем и методов улучшения качества асбеста, в том числе и схем снижения содержания тонкодисперсной фракции, производится на основе анализа требований стандартов к качеству готовой продукции (асбеста), а также требований потребителей и выбора критериев оценки качества.

2.6. Резюме

1. Основным методом обогащения асбеста является сухой гравитационный метод, основанный на принципе отсасывания асбестового волокна из дробленой руды.

2. Физический признак, используемый при обогащении асбеста, – различная скорость витания асбестового волокна и породы. Оптимальное извлечение асбеста происходит при условии, если скорость воздуха в воздухоприемнике больше скорости витания асбеста и меньше скорости витания породы.

3. Структуры схем обогащения асбеста всех современных фабрик состоят из трех переделов: дробильно-сортировочного комплекса (ДСК), рудного потока, перечистного потока;

4. Основные положения эффективной схемы ДСК следующие:

- 4–5 стадий дробления;
- использование во всех стадиях дробления, кроме I и II, дробилок ударного действия, обеспечение избирательности дробления;
- использование высокоэффективных операций предварительного и контрольного грохочения с выводом в отвал крупных фракций отходов;
- перенесение обогатительных операций грохочения с отсасыванием из передела рудного потока в ДСК и выделение асбестового волокна на ранних стадиях, исключая транспортировку его с рудой.

5. Наиболее прогрессивная современная схема рудного потока имеет следующие основные признаки:

- узкую шкалу классификации;
- использование вертикальных молотковых дробилок с увеличением скорости вращения ротора от стадии к стадии;
- использование для извлечения свободного асбестового волокна высокопроизводительных грохотов с отсасыванием;
- выделение отвальных хвостов в виде щебней и других строительных материалов;

6. Схема перечистного потока состоит из отдельных цепочек, в конце которых получается асбест определенной марки. Цепочки аппаратов для перечистки аналогичны для различных групп асбеста и состоят из 5–6 операций. Основное предназначение перечистного потока – доведение асбестового волокна до требований нормативов по показателям содержания пыли, гали и тонкодисперсной фракции.

3. КАЧЕСТВО АСБЕСТА И МЕТОДЫ ЕГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В обогащении полезных ископаемых принято оценивать качество готовой продукции и исходной руды одним и тем же показателем – содержанием полезного компонента.

При обогащении асбеста оценка качества исходной руды и готовой продукции различна. Качество исходной руды оценивается, как и в других отраслях, содержанием асбеста. Качество готовой продукции оценивается набором показателей, определяемых потребителями. Как правило, эти показатели определяются при классификации асбестового волокна на различных аппаратах. Производители и потребители асбеста имеют как общие методы оценки качества асбеста, так и специальные, характерные для той или иной отрасли потребления.

3.1. Методы определения качества асбестовой руды

Содержание полезного компонента для асбеста складывается из суммы содержания свободного и скрытого асбестового волокна. Существует несколько методик определения содержания асбеста: геологический метод, горный метод [17] и расчетный метод, предложенный В. А. Шалюгиной [18].

В промышленных условиях используется *горный метод* определения содержания асбеста. Поскольку асбест и вмещающая порода имеют одинаковый химический состав, за общее содержание асбеста принимается массовая доля асбеста более +0,5 мм. Определение массовой доли асбеста +0,5 мм осуществляется сухим механическим способом. Сущность способа заключается в предварительной классификации пробы, извлечении из классов крупности свободного асбестового волокна, перечистке данного волокна, дальнейшем стадийном дроблении и измельчении пробы с целью вскрытия и подпушки скрытого асбеста, извлечении и очистке его от породных частиц (рис. 3.1). Горный метод определения содержания асбеста в лабораторных условиях имитирует процесс обогащения асбеста.

Геологический метод определения асбеста подобен горному, но в большей степени использует ручную классификацию волокна с разделением на геологические сорта асбеста, которые в значительной степени отличаются от технологических сортов, вырабатываемых в промышленных условиях. Геологический метод определения содержания асбеста повсеместно использовался при разведке и утверждении запасов месторождений асбеста в России и Советском Союзе.

Расчетный метод основан на составлении баланса продуктов обогащения и предполагает определение содержания асбеста не в забое или керне скважины, а по результатам обогащения данной руды на обогатительной фабрике. Недостатком его является запаздывание данных о содержании асбеста и невозможность долгосрочного прогнозирования качества руды в забоях. Данный метод дает результаты, близкие к геологическому содержанию асбеста, на основании которого утверждались запасы всех основных месторождений хризотил-асбеста. Расчетный метод определения содержания асбеста использует баланс продуктов обогащения, полученный при переработке данной руды на обогатительной фабрике. Главной особенностью и отличием является то, что баланс составляется не по содержанию полезного компонента, как на всех обогатительных фабриках, а по содержанию асбестового волокна без тонкодисперсной фракции – 0,075 мм.

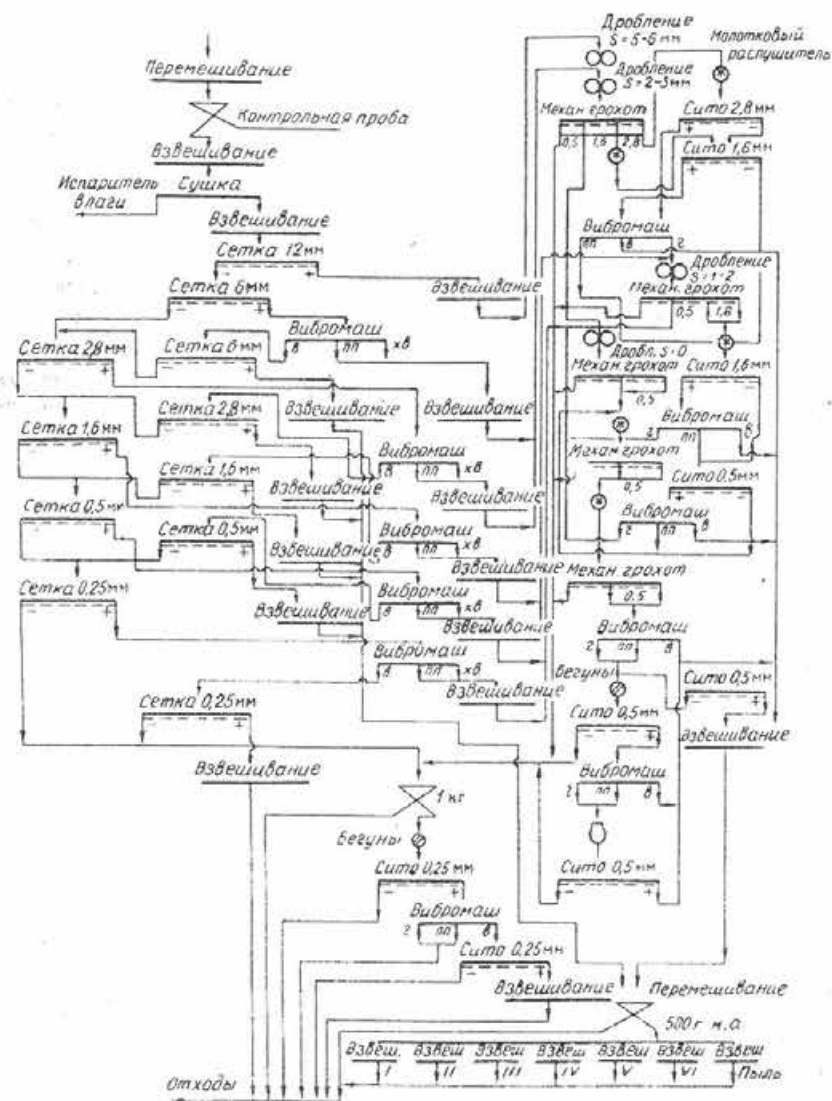


Рис. 3.1. Схема обработки проб горным методом:

в – волокно; III – промпродукт; хв – хвосты; г – галка; к. а. – контрольный аппарат;
Вибромаш – вибрационная машина

Содержание тонкодисперсной фракции в асбестовом волокне в данной методике является наиболее важным показателем. Оно определяется в готовой продукции и хвостах обогащения и затем из баланса процесса по асбестовому волокну, то есть по фракции +0,075 мм, определяется содержание данной фракции в руде, поступающей на фабрику, по формуле

$$\alpha_{+0,075} = \frac{Q_{т.а} \beta_{т.а} + Q_{хв} \beta_{хв}}{Q_p 100}, \quad (3.1)$$

где $Q_{т.а}$, $Q_{хв}$ и Q_p – соответственно количество товарного асбеста, хвостов и руды за расчетный период, т; $\beta_{т.а}$ и $\beta_{хв}$ – содержание фракции +0,075 мм соответственно в товарном асбесте и хвостах обогащения, %.

Поскольку общепринятым является содержание асбеста до +0,5 мм, а не до +0,075 мм, то с помощью известного содержания асбеста +0,075 мм в волокне исходной руды – β_p определяется расчетное содержание асбеста +0,5 мм по формуле

$$\alpha_{+0,5} = \frac{\alpha_{+0,075} 100}{\beta_p}. \quad (3.2)$$

При расчете содержания асбеста по данной методике может также присутствовать коэффициент перевода короткого волокна, но поскольку он является индивидуальным для каждого месторождения и каждой асбестообогащительной фабрики, то здесь не приводится.

Кроме содержания асбеста в исходной руде определяются следующие показатели:

- содержание фракции более +1,18 мм (+4 +14#) по аппарату «Бауэр-Мак-Нетт»;
- массовая доля асбеста классов +4,8 – 1,35 мм и +1,35 – 0,4 мм по анализу на контрольном аппарате;
- показатель обогатимости – доля короткого волокна к общему содержанию асбеста.

Первые два показателя характерны для готовой продукции и описаны ниже.

Данные российского (Р) и канадского (К) стандартов

Марка	Массовая доля остатка на ситах к. а., %, не менее			Массовая доля кл. – 0,4 мм, %, не более
	12,7 мм	4,8 мм	1,35 мм	
A – 1 – 50, Р	50	42	3	
З F, К	65,6	24,4	8,1	
A – 2 – 30, Р	30	48	15	
3К, К	43,8	43,8	25	
A – 2 – 22, Р	22	55	16	
3R, К	25	43,8	25	
A – 2 – 15, Р	15	60	18	
3 T, К	12,5	50	25	
3Z, К	6,3	56,2	25	
4A, К	-	50	37,5	
4D, К	-	43,7	37,5	
4H, К	-	31,3	50	
4K, К	-	25	56,2	
4M, К	-	25	50	
4R, К	-	18,8	56,2	
A – 3 – 60, Р	-	60	30	2,8
4T, К	-	12,5	62,5	
4Z, К	-	9,4	59,3	
A – 4 – 20, Р	-	20	58	4,5
5D, К	-	3,1	65,6	
A – 4 – 5, Р	-	5	70	5
5F, К	-	-	81,3	
5K, К	-	-	75	
5M, К	-	-	68,8	
A – 5 – 65, Р	-	-	65	9
5R, К	-	-	62,5	
A – 5 – 50, Р	-	-	50	10
6D, К	-	-	43,8	
A – 6 – 45, Р	-	-	45	12,5
7D, К	-	-	31,3	
A – 6 – 40M	-	-	40	13
7M, К	-	-	25	

Примечание. В случае превышения массовой доли остатка на сите с большим размером ячейки допускается уменьшение суммы остатков на последующих ситах.

Буквой «Р» обозначены данные российского стандарта, а буквой – «К» – канадского [26, 27], непосредственно под российской маркой расположен ее канадский аналог. В таблице приведены и другие канадские марки асбеста, не имеющие российских аналогов, российские же марки приведены не полностью. Аналогия марок дана, как можно видеть, не по результатам анализа асбеста на к. а, но исходя из практики замены марок при производстве асбестоцементных изделий.

3.2. Методы определения качества асбеста у производителей

Качеством асбеста называется совокупность определенных физических свойств волокна, влияющих на технологию его дальнейшей переработки у потребителей. Такими свойствами являются длина асбестового волокна, наличие в нем вредных включений, к которым относятся включения магнетита, немалита и включения самой вмещающей породы (серпентинита или перидотита). То есть качество асбеста для различных потребителей различно и определяется набором различных показателей.

Показатели качества, как правило, определяются методами классификации асбестового волокна.

В настоящее время качество асбеста как готовой продукции оценивается по ГОСТ–12871–93 и ТУ–5721–10–0284351–2000, ГОСТ–259854.1–83 – ГОСТ–25984.5–83, ГОСТ–25984.6–99, ГОСТ–25983–83, ТУ–5721–01–0281476–2000 [19–25]. Кроме того, существует ряд методик, по которым определяют качество асбеста за рубежом. Основными аппаратами, предназначенными для анализа асбеста на качество, как в России так и за рубежом, являются контрольный аппарат (квебекский аппарат, по канадской терминологии) и гидроклассификатор «Бауэр-Мак-Нетт». Оба аппарата осуществляют условное разделение асбеста готовых марок на фракции: контрольный аппарат – сухим способом, гидроклассификатор «Бауэр-Мак-Нетт» – мокрым способом.

Контрольный аппарат – это лабораторный грохот с размерами ячеек 12,7 мм, 4,8 мм, 1,35 мм и 0,4 мм. Время анализа строго регламентировано и составляет 2 мин. Режим работы стационарный. По результатам анализа асбеста на контрольном аппарате определяют содержание остатков на ситах и просев сквозь нижнее сито (пыль): по российским стандартам в процентах, по канадским – в унциях. Навеска асбеста на квебекский аппарат составляет 16 унций. По результатам анализа асбеста на контрольном аппарате ему присваивается марка. Основные наименования марок и соответствующие им остатки на ситах контрольного аппарата (в дальнейшем к. а.) приведены в табл. 3.1.

Гидроклассификатор «Бауэр-Мак-Нетт» осуществляет мокрый анализ асбеста в горизонтальном потоке воды при стационарном ее расходе (рис. 3.2). В мировой практике известны пяти- и четырехбачковые гидроклассификаторы. Российский ГОСТ–25984.6–99 предполагает возможность их равнозначного использования. Размер ячеек сит, применяемых при анализе, – 4,75 мм, 1,18 мм, 0,425 мм, 0,150 мм, 0,075 мм. По международной классификации это соответствует 4#, 14#, 35#, 100#, 200#. В четырехбачковом гидроклассификаторе отсутствует сито 0,150 мм (100#). Основные показатели, которые используются как при выработке асбеста, так и при его использовании, – это показатели суммы двух первых

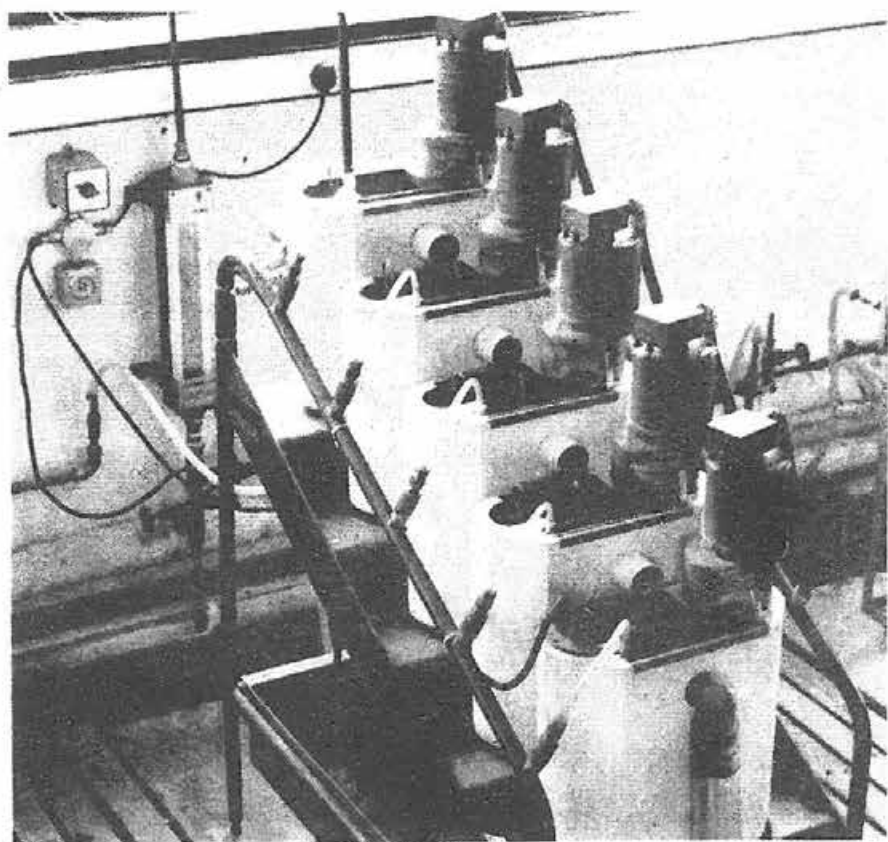


Рис. 3.2. Гидроклассификатор «Бауэр-Мак-Нетт»

сит аппарата «Бауэр-Мак-Нетт» (в дальнейшем БМН) – В_{+1,18} и тонкодисперсной фракции – 0,075 мм – В_{0,075}. Данные показатели нормируются всеми известными мировыми стандартами.

За рубежом используются и другие лабораторные аппараты для оценки качества асбеста. Все они так же, как к. а. и БМН, производят условное разделение асбеста на фракции. К самым распространенным следует отнести гидроклассификаторы «Тернер-Ньюал» и «Элютриатор». Гидроклассификатор «Тернер-Ньюал» – это пятиситный вертикальный классификатор, на котором производится разделение асбеста на фракции в вертикальном потоке воды с постоянным, заданным расходом. Размеры сит, используемые при анализе на классификаторе «Тернер-Ньюал», следующие: 7# (2,4 мм), 14# (1,2 мм), 25# (0,6 мм), 50# (0,3 мм), 200# (0,075 мм), –

200#. Данный метод менее точный, чем метод анализа асбеста на аппарате БМН, но более оперативный. «Элютриатор» – это гидрокласификатор, принцип работы которого основан на различии в скоростях падения в водной среде частиц различной крупности. Две емкости данного аппарата работают на таком принципе при переливе воды из первого бачка во второй, в третьем бачке установлено сито с размером ячейки 200# (0,075 мм). Данный аппарат определяет четыре условные фракции: нераспушенное волокно, частично распушенное волокно, распушенное волокно и тонкодисперсную фракцию.

Таблица 3.2

Результаты анализов асбеста России и Канады

Наименование показателя	Россия	Канада
	А-3-60	4Т-300
Остатки на ситах к. а., %		
2 сито	75	59
3 сито	20	29
Массовая доля фр. БМН, %		
4#	18	26
14#	21	20
35#	14	16
100#	8	7
200#	5	3
-200#	39	28
Массовая доля фр. Тр-Н, %		
7#	9	12
14#	15	19
25#	28	29
50#	16	13
200#	18	15
-200#	14	12
Фракции элютриатора, %		
нераспушенный	11	21
частично распушенный	2	3
распушенный	54	56
-200#	33	20
Удельная поверхность по Рапид-Тестеру, дм ² /г	105	72
Влажный объем, мл	1245	1025
Фильтрация, с	94	74

Кроме перечисленных анализаторов в зарубежной практике для оценки качества асбеста используются такие аппараты, как Рапид и Ригден – для определения степени распушки асбеста (удельной поверхности волокна при прохождении воздушного потока), Ро-Тап – для определения гранулометрического состава коротковолокнистого асбеста сухим способом, Инвертор – для определения объема асбеста во влажном состоянии,

установка—для определения скорости фильтрации асбеста в известковом растворе. В табл. 3.2 приведены сравнительные анализы марок — аналогов России и Канады на некоторых аппаратах.

Исходя из данных табл. 3.1 видно, что значения одних и тех же фракций по анализу на различных аппаратах значительно отличаются. Например, содержание тонкодисперсной фракции менее 0,075 мм по аппарату БМН и «Тернер-Ньюэл» для асбеста марки А-3-60 соответственно 39 и 14 %. Причина этого явления — различия в режимах классификации аппаратов.

Оценка качества хризотил-асбеста является неполной, если не учитывать критерии потребителей.

3.3. Потребительские критерии оценки качества асбеста

Оценка качества хризотил-асбеста в России

Потребительской оценкой качества готовой продукции называется анализ пригодности использования данной продукции как сырья в технологии изготовления конечных изделий.

Подход к оценке качества готовой продукции любой обогащательной фабрики возможно и необходимо рассматривать с точки зрения эффективности последующего процесса ее обработки и качества конечных изделий. Так, в черной металлургии содержание суммы окислов $Fe_2O_3 + Fe_3O_4$ и содержания вредных примесей достаточно полно отражают эффективность последующего процесса выплавки чугуна, а также его качество. Для других отраслей производства, которые используют концентраты горнорудной промышленности как сырье, в большинстве случаев содержания полезного компонента и его примесей являются достаточными критериями для оценки качества этого сырья с точки зрения последующей его обработки.

Для асбеста основным последующим процессом является производство асбестоцементных изделий. С точки зрения эффективности асбестоцементного производства содержание хризотил-асбеста в готовой продукции является незначительным показателем. Причина этого — одинаковый химический состав полезного компонента — хризотил-асбеста и пустой породы — серпентинита.

Содержание асбеста во всех группах составляет практически 100 %. Различными для групп асбеста являются результаты определения фракционного состава на контрольном аппарате и аппарате «Бауэр-Мак-Нетт», подробно описанные выше. Так, содержание тонкодисперсной фракции — 0,075 мм — для асбеста 3-й группы составляет 30-45 %, а для асбеста 6-й группы — 55-65 %. Данный показатель в значительной степени влияет на

качество асбестоцементных изделий, которое определяется пределом прочности при изгибе $R_{изг}$.

На асбестоцементных предприятиях для обеспечения $R_{изг}$ изделий в соответствии с нормативами [28] рассчитывают асбестовую смесь.

Пример

Для производства волнистого шифера используют асбестовую смесь следующего состава:

- Асбест марки А-5-65 — 60 %;
- Асбест марки А-6-45 — 40 %.

Анализ качества выпускаемых марок асбеста показывает, что содержание фракции +4,75+1,18 мм (β_+) и содержание тонкодисперсной фракции — 0,075 мм (β_-) могут варьировать в широких пределах. То есть в конкретном случае приготовления смеси с равной вероятностью показатель β_+ может соответствовать значениям β_{+1} ; β_{+2} ; β_{+3} ; ... β_{+n} , и показатель β_- — значениям β_{-1} ; β_{-2} ; β_{-3} ; ... β_{-n} . Берковичем Т. М. [29] приведен расчет количества асбеста в асбестовой смеси для изготовления асбестоцементных изделий в зависимости от показателей β_+ и β_- в асбесте определенных групп.

Расчет основывается на следующих принципах:

- содержание фракций β_+ и β_- в смеси нормируется:

$$\beta_+ = \beta_{+i}; \beta_- = \beta_{-i};$$

- содержание β_{+i} и β_{-i} в i -й смеси рассчитывается для данного примера следующим образом:

$$\beta_{+i} = \frac{\beta_{+i1} \cdot 60}{100} + \frac{\beta_{+i2} \cdot 40}{100}; \quad (3.3)$$

$$\beta_{-i} = \frac{\beta_{-i1} \cdot 60}{100} + \frac{\beta_{-i2} \cdot 40}{100}; \quad (3.4)$$

где β_{+i} ; β_{-i} — показатели β_+ и β_- для первого компонента смеси, %, в данном случае марки асбеста А-5-65; β_{+i2} ; β_{-i2} — показатели β_+ и β_- для второго компонента смеси, %, в данном случае марки асбеста А-6-45.

В общем случае расчет смеси производится по формуле

$$\beta_i = \frac{\beta_{i1} \cdot P_1}{100} + \frac{\beta_{i2} \cdot P_2}{100} + \frac{\beta_{in} \cdot P_n}{100}; \quad (3.5)$$

где $P_1, P_2 \dots P_n$ — доля n -й марки асбеста в смеси.

На основе сравнения фактически полученных β_{+i} и β_{-i} и нормируемых рассчитывается количество асбеста.

Зарубежные критерии оценки качества асбеста

На зарубежных асбестоцементных предприятиях Японии, Индии, Ирана, Бразилии, Ю.Кореи и др. при корректировке количества асбеста в асбестовой смеси и оценке его качества используются **расчетные критерии**.

Для вычисления таких критериев применяются данные анализа как на гидроклассификаторе «Бауэр-Мак-Нетт» и контрольном аппарате, так и на гидроклассификаторе «Тернер-Ньюэл».

Асбестоцементные предприятия Латинской Америки и Ирландии [30, 31] качество асбеста оценивают с помощью индексов. Используются индексы различных лабораторных классификаторов. Существует индекс по контрольному аппарату. Индекс по контрольному аппарату вычисляется по следующей формуле:

$$J_{\text{к.а.}} = \frac{1}{3}(4q_1 + 3q_2 + 2q_3 + q_4 - 100). \quad (3.6)$$

Существует другой расчетный показатель, определяемый по анализу асбеста на контрольном аппарате. John E. Willden [30] называет его «TV-Tenz voulem» и предлагает рассчитывать по следующей формуле:

$$TV = (4,25q_1 + 3,5q_2 + 2q_3 + 0,5q_4). \quad (3.7)$$

«Tenz voulem» используется на асбестоцементных предприятиях Ю. Кореи, Ирана и Сирии.

«VOITH» (Австрия) [32] приводит расчетный показатель качества асбеста – индекс по гидроклассификатору «Бауэр-Мак-Нетт», который определяется по формуле

$$J_B = 1/4(5q_1 + 4q_2 + 3q_3 + 2q_4 + q_6 - 100). \quad (3.8)$$

Таких расчетных критериев можно привести еще несколько. В общем виде они могут быть записаны следующим образом:

$$J_n = a_1q_1 + a_2q_2 + a_3q_3 + \dots + a_nq_n, \quad (3.9)$$

где $q_1, q_2, \dots, q_n, q_{n-1}$ – остатки на соответствующих ситах классифицирующего лабораторного аппарата, %; $a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$ – заданные коэффициенты значимости каждого остатка.

Причем в первом приближении $a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$ – это ряд чисел, где соблюдаются условия:

$$a_1 > a_2 > a_3 > \dots > a_n. \quad (3.10)$$

Существует множество различных сочетаний q_1, q_2, \dots, q_n , для которых расчетный показатель J_n одинаков, то есть соблюдаются условия:

$$\begin{cases} J_{n1} = J_{n2} \\ q_{11} \rightarrow \max; \quad q_{n1} \rightarrow \max \\ q_{12} \rightarrow \max; \quad q_{n2} \rightarrow \max. \end{cases} \quad (3.11)$$

где q_{11} и q_{n1} – остатки на ситах классифицирующего аппарата для асбеста пробы № 1, представляющей один уровень качества, а q_{12} и q_{n2} – остатки на ситах того же аппарата для пробы № 2, представляющей другой уровень качества.

Выражение (3.11) обозначает, что при различном качестве асбеста, например, по содержанию фракций +4,75+1,18 мм и тонкодисперсной фракции – 0,075 мм на аппарате «Бауэр-Мак-Нетт» или других аппаратах, возможно получить одинаковые значения J_n .

В табл. 3.3 приведена классификация основных показателей качества асбеста. Они подразделяются на природные, косвенные и расчетные. Кроме того, все перечисленные показатели определяются либо сухим, либо мокрым методом. Последним в классификационной таблице назван показатель FSU, который описан ниже.

Fiber Strength Unit Test (FSU)

Применение расчетных критериев не дает объективной потребительской оценки качества хризотил-асбеста. Прямое определение фракционного состава асбеста на аппарате «Бауэр-Мак-Нетт» достаточно достоверно отражает реальное качество с точки зрения потребителей, но не учитывает природную прочность асбестового волокна.

Однако, как отмечает Огнев А. С. [33], природные свойства асбеста зависят от условий образования минерала и в целом месторождения. Асбестовое волокно различных месторождений хризотил-асбеста и залежей внутри одного месторождения различны по прочности. При одинаковом фракционном составе по содержанию фракции +4,75+1,18 мм и тонкодисперсной фракции они имеют различные показатели $R_{\text{изг}}$ изделий. Это определено химическими методами исследований и прямым изготовлением изделий из асбеста различных природных разновидностей.

Мировая практика использования хризотил-асбеста обусловила необходимость единого прямого критерия. Критерием был назван FSU – единый показатель прочности волокна (технологической ценности). Методика определения и расчета FSU разработана Канадским институтом асбеста [34] и сводится к следующему: на основе хорошо усредненного образца одной марки асбеста изготавливаются десять асбестоцементных образ-

Таблица 3.3

Классификация показателей качества асбеста

Природные	Ед. изм.	Косвенные	Ед. изм.	Расчетные	Область применения
1	2	3	4	5	6
Сухие методы					
Определение цветности Определение потерь при прокаливании	%	Остаток на основном сите контрольного аппарата (к. а.)	%	Индекс по контрольному аппарату	Изготовление асбестоцементных, асбестотехнических и текстильных изделий, красок, лаков и полимеров
		Массовая доля фракции -0,4 мм по к. а.		То же	
		Массовая доля гали		— " —	
		Массовая доля фракции +0,8 мм на аппарате «Ротап»		Изготовление изделий, лаков, красок, наполнителей	
		Массовая доля фракции -0,2 мм на аппарате «Ротап»		То же	
		Удельная поверхность (аппараты «Рапид», «Ригден», «Дикергоффа», «ОПА», «ПРА»)		Изготовление текстильных изделий, асбестотехнических изделий	
		дм ² /г (см ² /г)		Изготовление лаков и красок	
				Изготовление текстильных и фрикционных изделий	
Мокрые методы					
		Массовая доля суммы сит +4,75 +1,18 мм по аппарату «Бауэр-Мак-Нетт» (БМН)	%	Индекс по аппарату «Бауэр-Мак-Нетт»	Изготовление асбестоцементных изделий
		Массовая доля фракции -0,075 мм по БМН	%	Индекс по аппарату «Бауэр-Мак-Нетт»	То же
		Массовая доля фракции +1,2 мм по аппарату «Тернер-Ньюал» (Т-Н)	%	Индекс по аппарату «Тернер-Ньюал»	— " —

Окончание табл. 3.3

1	2	3	4	5	6
		Массовая доля крупа на аппарате «Элютриатор»	%	Индекс по «Элютриатору»	Изготовление асбестоцементных изделий
		Массовая доля фракции -0,075 мм по «Элютриатору»		Индекс по «Элютриатору»	То же
		Скорость фильтрации Fiber-Streight-Unit-Test (FSU)	с	Индекс по «Элютриатору»	— " —
			%		Изготовление асбестоцементных и асбестотехнических изделий

цов – плиток. При этом используются цемент и кварцевый песок одинакового качества, заданные режимы подготовки образца, прессования и твердения. У полученных образцов путем измерения силы, необходимой для разрушения образца, и площади его сечения определяется предел прочности при изгибе $R_{изг}$. $R_{изг}$ рассчитывается как средний результат из десяти испытаний. Показатель FSU вычисляется по формуле, %

$$FSU = \frac{1000}{F_{er}}; \quad (3.12)$$

$$F_{er} = 100 \frac{275F}{R_{изг}(100 - F) + 275F}; \quad (3.13)$$

где F – расход асбеста при изготовлении асбестоцементных плиток, %; 275 кг/см^2 – предел прочности при изгибе эталонного образца.

Возможно пользоваться и прямыми результатами определения $R_{изг}$ асбестоцементных плиток. Однако расчет асбестовой смеси для асбестоцементного производства в таком виде неудобен.

Значение $R_{изг} = 275 \text{ кг/см}^2$ выбрано экспериментально.

Использование на практике для оценки качества хризотил-асбеста показателя FSU позволило «нейтрализовать» природные свойства асбестов различных месторождений и видов.

При значительно лучших результатах по аппарату «Бауэр-Мак-Нетт» канадского асбеста марки 5R он имеет практически одинаковые средние показатели FSU с уральским асбестом марки А-5-65 (88 % против 86), что объясняется различием природной прочности хризотил-асбеста Урала и Канады.

3.4. Резюме

1. Анализ методов оценки качества асбестового волокна в исходной руде, готовой продукции и в условиях потребителей показал, что наиболее важными показателями являются:

- содержание тонкодисперсной фракции менее 0,075 мм;
- содержание фракции более 1,18 мм;
- природная прочность асбеста.

2. Комплексным показателем оценки качества хризотил-асбеста является FSU – единый показатель прочности асбестового волокна (технологическая ценность).

3. Совершенствование технологического процесса обогащения асбеста с целью улучшения качества направлено на улучшение показателей содержания тонкодисперсной фракции менее 0,075 мм и содержания фракции более 1,18 мм.

4. АДСОРБЦИЯ ТОНКОДИСПЕРСНОЙ ФРАКЦИИ НА АСБЕСТОВОМ ВОЛОКНЕ

Показатель качества асбеста, дающий количественную оценку доли тонкодисперсной фракции крупностью менее 0,075 мм, адсорбированной на чистом асбестовом волокне, очень важен для процесса обогащения асбеста.

В 1960-е годы исследования Т. М. Беркович совместно с А. И. Бирюковым [35] и И. И. Берней [36, 37] показали степень влияния количества тонкодисперсной фракции – 0,075 мм на прочностные показатели асбестоцемента. Показатель предела прочности при изгибе $R_{изг}$ готовых асбестоцементных изделий уменьшается прямо пропорционально росту показателя содержания тонкодисперсной фракции – 0,075 мм в асбесте.

За рубежом определение тонкодисперсной фракции в асбесте производилось гораздо ранее, чем в России. Например, в Канаде данный показатель качества определялся с начала 40-х годов XX века.

В России впервые в нормативную документацию о качестве готовой продукции ввели показатель содержания тонкодисперсной фракции в 1975 году. Определение производилось на относительном гидрокласификаторе ОКА, разработанном институтом «ВНИИпроектасбест» [38]. Затем в государственный стандарт был включен метод определения фракционного состава на диафрагмовом гидрокласификаторе, а в 2001 году в технические

условия ТУ 5721–10–0284351–2000 был введен показатель содержания фракции 0,075 мм по гидрокласификатору «Бауэр–Мак–Нетт».

Необходимо пояснить первоначально данное понятие тонкодисперсной фракции. Не всякая частица, имеющая крупность менее 0,075 мм и соответствующая по химическому составу хризотил-асбесту, будет адсорбироваться на поверхности чистого асбестового волокна. В потоке руды, как и в готовой продукции, присутствует значительное количество неадсорбированных свободных мелких частиц. Согласно ГОСТ, при крупности менее 0,4 мм они называются пылью. В составе пыли также присутствуют частицы крупностью менее 0,075 мм, но такие частицы здесь не рассматриваются.

4.1. Состав и размеры тонкодисперсной фракции

Электронномикроскопические исследования, проведенные Т. А. Михайлищевой [39], показали, что в асбесте 5-го и 4-го сортов фабрики № 5 комбината «Ураласбест» адсорбированная тонкодисперсная фракция состоит из 18–20 % микроволокон и 80–82 % породных микрочастиц, для асбеста 3-го сорта эти показатели составляют соответственно 25–30 и 70–75 %. Максимальный размер волокна в адсорбированной тонкодисперсной фракции, по данным Т. А. Михайлищевой, – 2 мм.

Изучение частиц адсорбированной тонкодисперсной фракции В. В. Знаменским [40] позволило классифицировать их по размерам. По данным В. В. Знаменского, адсорбированная тонкодисперсная фракция состоит из мелких породных частиц (соринок), диаметр которых составляет 0,002–0,010 мм и длина 0,003–0,080 мм. Размеры волокон (нитей) в составе тонкодисперсной фракции следующие: диаметр – 0,002–0,005 мм, длина – 0,080–0,300 мм. Кроме вышеназванных разностей в адсорбированной тонкодисперсной фракции присутствует небольшое количество агрегатов, которые состоят из нескольких сростков волокон (пучки). Их размеры следующие: диаметр – 0,010–0,025 мм, длина – 0,080–0,5 мм.

Изучение тонкодисперсной фракции Т. А. Михайлищевой и В. В. Знаменским проводилось на готовых марках асбеста. В. И. Ефимов [41] изучал под микроскопом тонкодисперсную фракцию асбестового волокна горных проб. По его данным, она состоит на 50 % из микроволокон длиной 0,1 мм и менее и на 50 % из породной пыли.

Исследования показали, что асбестовое волокно, вручную выделенное из жилы хризотил-асбеста, имеет содержание тонкодисперсной фрак-

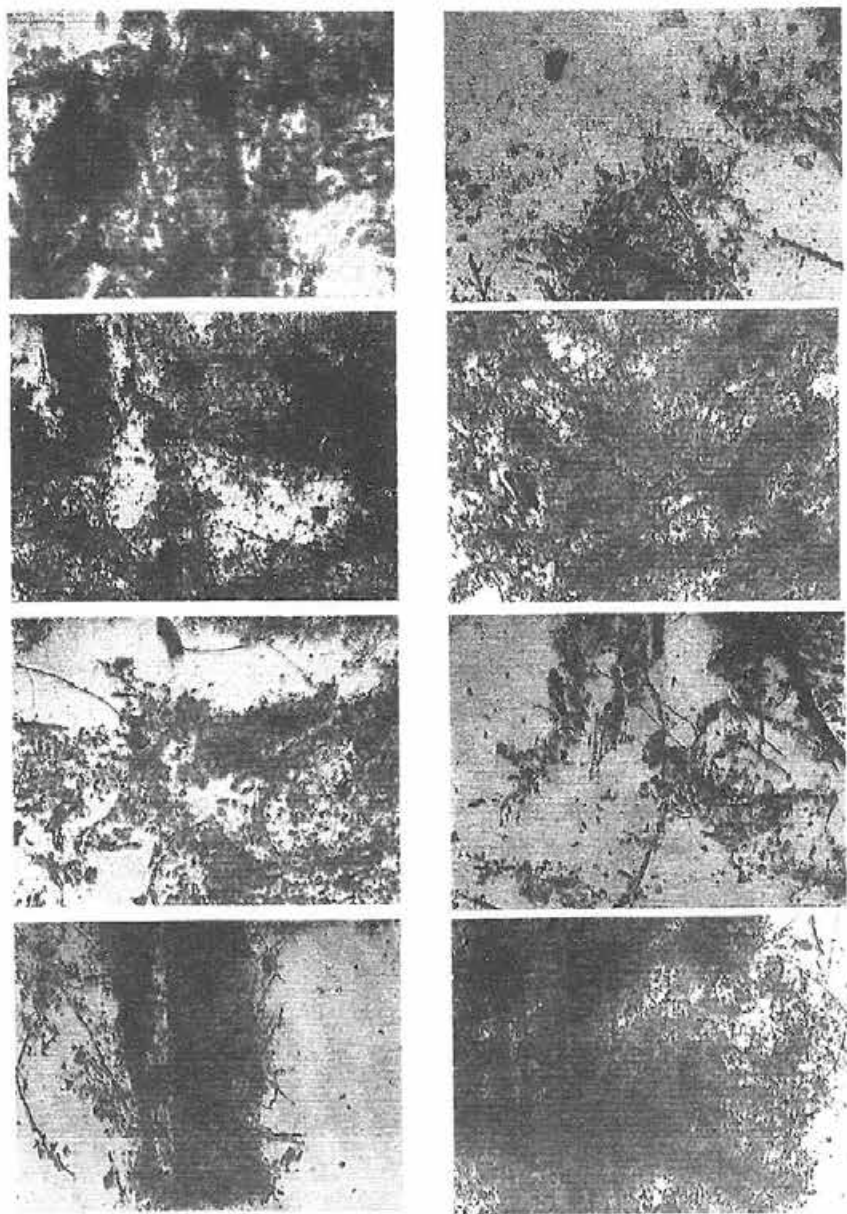


Рис. 4.1. Вид тонкодисперсной фракции волокна руды ДСК

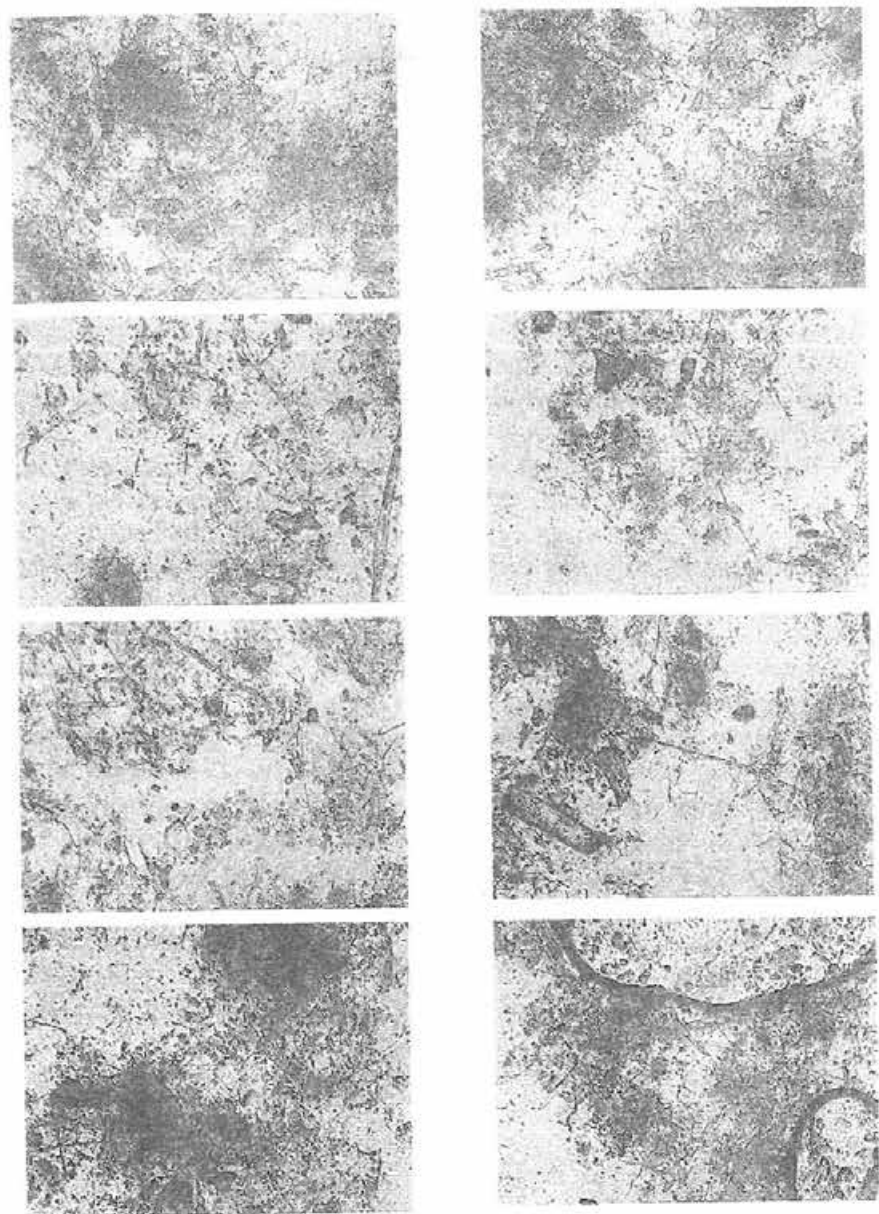


Рис. 4.2. Вид тонкодисперсной фракции в асбесте 5-й группы

ции, близкое к 0. Содержание тонкодисперсной фракции в волокне жил в среднем составляет 3 %. Для сбора тонкодисперсной фракции волокна жил исходной руды были использованы плотные бумажные фильтры, но они не позволили ее уловить. При этом поверхность фильтров слегка потемнела, что указывает на то, что частицы данной фракции имеют очень малые размеры.

Определение содержания тонкодисперсной фракции в асбестовом волокне исходной руды, которое производится ежемесячно на каждой асбестообогатительной фабрике после обработки горной пробы, показывает, что ее уровень колеблется от 30 до 50 %. Таким образом, за период взрывания, экскавации, транспортировки руды с рудника и дробления ее в ДСК содержание тонкодисперсной фракции в асбестовом волокне прирастает в 10 раз. Далее рассмотрены причины этого явления.

На рис. 4.1 изображена тонкодисперсная фракция асбестового волокна исходной руды, заснятая при исследовании под микроскопом при увеличении 1:20. Из рисунка видно, что она в основном представлена мелкими породными частицами с наличием небольшого количества тонкого волокна. Все снимки предоставлены М. Ю. Куршаковым (ЦНИИмаш – Москва). На рис. 4.2 изображена тонкодисперсная фракция, выделенная из асбеста готовой 5-й группы. Здесь также в большей степени присутствуют породные фракции, но есть и тонкие короткие асбестовые волокна. Визуально подтверждаются в большей степени данные Т. А. Михайлищевой, а именно адсорбированная тонкодисперсная фракция в основном состоит из породных микрочастиц. Однако присутствие волокнистой части в данной фракции отрицать нельзя. Исследование механизма образования тонкодисперсной фракции для микрочастиц породы и микроволокна подразделяется:

- на исследование поверхностных свойств минеральных частиц – участниц процесса обогащения асбестовой руды;
- изучение теоретических основ процесса адсорбции тонкодисперсной фракции;
- моделирование процессов транспортировки и перемешивания асбестовой руды и волокна.

4.2. Поверхностные свойства минеральных частиц при обогащении асбеста

Образование тонкодисперсной фракции из микрочастиц породы

Процесс адсорбции микрочастиц тонкодисперсной фракции на асбестовом волокне основан на поверхностных явлениях в двойном электрическом слое. Данная адсорбция является поверхностной.

При переработке асбестовой руды на обогатительной фабрике в процессах дробления, транспортировки, сушки и обогащения участвуют две фазы: твердая – это породная фаза плюс асбестовое волокно; жидкая – поверхностная и капиллярная вода, которая постоянно сопровождает руду вследствие высокой влажности окружающего воздуха. Третья, газовая фаза, в процессах, происходящих в двойном электрическом слое, не участвует. Химический потенциал любой гомогенной фазы [42, 43], как твердой, так и жидкой, в равновесном состоянии имеет постоянную величину во всем объеме данной фазы. Вместе с тем величина химического потенциала для данного компонента в различных фазах имеет различные значения. При соприкосновении двух фаз на границе раздела происходит переход компонентов из фазы с более высоким значением химического потенциала в фазу с меньшей его величиной. Переход заряженных компонентов (ионов, электронов) приводит к образованию заряда в одной фазе и равного, но противоположного по знаку заряда – в другой [44]. Эти противоположные заряды, благодаря взаимному притяжению, остаются на границе раздела, образуя двойной электрический слой.

Представление о двойном электрическом слое, как о плоском конденсаторе, развитое в классических работах Гельмгольца, получило дальнейшее развитие в трудах Смолуховского, Гуи, Чэпмена, Штерна и других ученых [45]. Исследования электрокинетического потенциала хризотил-асбеста различных месторождений провели Грачева О. И., Епинатьева В. И. [46], Хадсон А. А. [47]. Данными исследованиями был изучен ζ -потенциал (электрокинетический потенциал) чистого асбестового волокна – недеформированного волокна исходной руды, не подвергавшейся механической обработке. Условно можно считать, что ζ -потенциал равен химическому потенциалу. Определение ζ -потенциала производили по классической методике, используя явление электроосмоса [48].

Сущность явлений, происходящих на границе раздела фаз, а значит и поверхностей, раскрывается через представление об ионном обмене между

фазами. Например, для чистого асбестового волокна нормальной прочности, по данным Грачевой О. И. [46], этот процесс можно описать так:

– ионы, входящие в состав твердой фазы, например гидроксил-анионы (ОН), возникшие в результате диссоциации, образуют внутреннюю обкладку двойного слоя. Ионы противоположного знака, в данном случае – это катионы двухвалентного магния Mg^{++} , отделившиеся от твердой фазы также при диссоциации, образуют внешнюю обкладку двойного слоя (рис. 4.3);

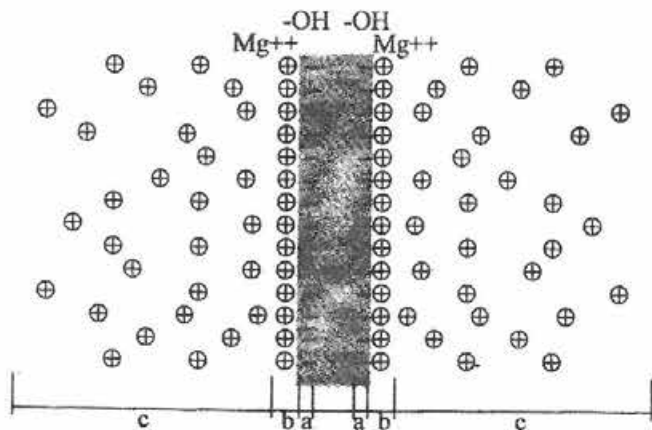


Рис. 4.3. Распределение избыточных ионов в двойном электрическом слое чистого волокна хризотил-асбеста нормальной прочности:
а – внутренняя обкладка; б – плотный слой; с – диффузный слой.

– ионы внешней обкладки, притянутые электрическими силами в плотную к внутренней обкладке, образуют «плотный» слой внешней обкладки;

– часть ионов внешней обкладки благодаря молекулярному тепловому движению и большей кинетической энергии по сравнению с другими, преодолевают потенциальную энергию поля и уходят в объем поверхностной жидкости, в данном случае – воды. Этот слой называется диффузным.

В результате устанавливается динамическое равновесие, в котором скорость диффузии ионов из поверхности волокна (твердой фазы) в «объем» жидкости равна скорости обратного процесса, обусловленного полем электростатических сил.

Многочисленные исследования ζ -потенциала хризотил-асбестов различных природных разновидностей показали их отличия по уровню данного показателя. Так, для волокон нормального хризотил-асбеста характерно значение ζ -потенциала +18 ... +27 мВ, ломкий хризотил-асбест имеет отрицательный или нулевой ζ -потенциал.

Автором совместно с инженером-химиком Г. Ф. Тюменцевой были проведены исследования микроэлектрических характеристик поверхности частиц пустой породы различного минералогического состава для вновь образованной поверхности раскола данных кусков, а также асбестового волокна и тонкодисперсной фракции. Средние из 10 определений ζ -потенциала приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Средние значения ζ -потенциала различных видов пустой породы, асбестового волокна и тонкодисперсной фракции

Наименование породы, продукта	Волокно нормальной прочности	Тонкодисперсная фракция П сита к. а.	Тонкодисперсная фракция из пыли	Выносы эл. фильтров	Серпентинит	Перидотит	Тальк-карбонат
ζ , мВ	+18 -+20	+16,9	+11,4	+14,7	-3,8	+3,9	-17,1

Исходя из результатов определения электрокинетического потенциала свежерасколотых пород, процесс адсорбции породных микрочастиц на асбестовом волокне может быть представлен следующим образом.

В процессе дробления, транспортировки и сушки асбестовой руды образуются значительные по площади свежерасколотые поверхности, которые тут же увлажняются капиллярной водой, и наряду с этим отколовшиеся от данного вида породы частицы крупностью менее 0,075 мм, также увлажненные. В начальный момент времени заряд поверхности данных микрочастиц одинаков с зарядом породы и имеет либо отрицательное значение, либо слабо положительное, как видно из табл. 4.1. Отрицательный заряд поверхности обеспечивают отрицательные двухвалентные анионы кремнекислоты SiO_3^{--2} , находящиеся в «плотном» слое, тогда как слой внутренней обкладки образуют катионы водорода H^+ . В момент раскола породы и отделения микрочастиц находящиеся в прямом соприкосновении с ними волокна (фибриллы или агрегаты) асбеста адсорбируют на себя эти частицы. Сила, которая преимущественно действует в данный момент времени, вызвана разностью потенциалов, возникшей

между катионами «плотного» и диффузного слоев волокнистого агрегата, то есть катионами Mg^{+2} и анионами кремнекислоты SiO_3^{-2} , которые находятся в «плотном» и диффузном слоях вновь образованной микрочастицы. Причем чем больше разность потенциалов между взаимодействующими частицей и агрегатом, тем больше по количеству адсорбируется микрочастиц тонкодисперсной фракции на нем. Так, очевидно, что микрочастицы, образованные из перидотита, адсорбируются в наименьшем количестве, чем микрочастицы из серпентинита, и в значительно меньшем количестве, чем тальк-карбонатные микрочастицы.

На рис. 4.4 изображена схема адсорбции тонкодисперсной фракции для серпентинитовых микрочастиц. Из рисунка видно, что происходит притяжение отрицательно заряженных вновь образованных микрочастиц и положительно заряженного агрегата волокна. Причем в случае положительно заряженных микрочастиц, состоящих из перидотита ($\zeta = +3 \dots +4$ мВ), они также притянутся к волокну. Связь между волоком и микрочастицей будет более слабой, чем в случае серпентинитового и тальк-карбонатного составов породы. Общий заряд поверхности вновь образованного конгломерата, состоящего из волокна и тонкодисперсной фракции, снижается по отношению к условно чистому волокну на величину разности зарядов.

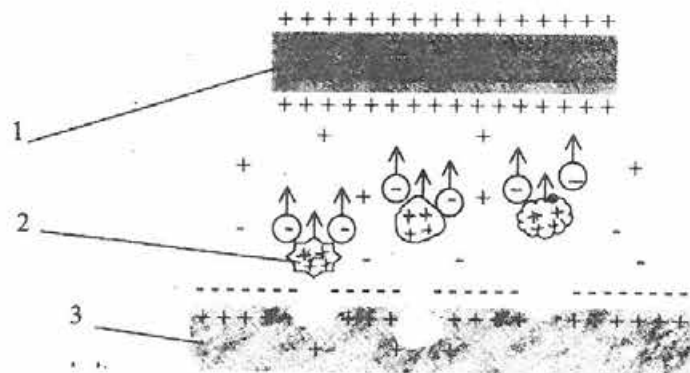


Рис. 4.4. Схема адсорбции тонкодисперсной фракции на асбестовом волокне:
1 – асбестовое волокно; 2 – тонкодисперсная фракция; 3 – серпентинит

В последующие циклы технологического процесса система: конгломерат (волокно + тонкодисперсная фракция) – пустая порода стремится к состоянию динамического равновесия. При его достижении работа переноса 1 моль против электрических сил $z_i F \Delta\phi$ (где z_i – валентность i -го

компонента; F – число Фарадея; $\Delta\phi$ – максимальная равновесная величина разности потенциалов) должна быть равна уменьшению химического потенциала $\Delta\mu_i$:

$$\Delta\mu_i + z_i F \Delta\phi = 0. \quad (4.1)$$

Формула (4.1) является классическим уравнением электрохимии [43], и из него можно вывести уравнение, по которому вычисляется количество тонкодисперсной фракции, адсорбированной на чистом волокне в процессе переработки асбестовой руды в общем виде, а также для отдельных операций и узлов.

Образование тонкодисперсной фракции из микроволокна

Микроволокно адсорбируется на асбестовые волокна нормальной величины (далее технологические) прежде, чем микрочастицы породы, и имеет более прочную связь.

Из рис. 4.1, 4.2 видно, что количество микроволокон в тонкодисперсной фракции исходной руды и готовой продукции примерно одинаковое. Но готовая продукция прошла несколько стадий очистки. Характер тонкодисперсной фракции просевных продуктов после очистки (рис. 4.5) подтверждает, что в пересортировке отделяется тонкодисперсная фракция, состоящая в основном из микрочастиц породы. Эти породные микрочастицы отсутствуют в составе исходной руды, а это значит, что они адсорбировались на волокно в процессе технологической переработки руды.

Адсорбция микроволокна на поверхность технологического волокна происходит также по законам взаимодействия зарядов в двойном электрическом слое.

Отличие от породных микрочастиц состоит в том, что тонкая игольчатая форма микроволокна обеспечивает более сильное поверхностное притяжение и большую площадь соприкосновения зарядов. Но возникновение разности потенциалов невозможно при одинаковой величине и знаке заряда. Поэтому очевидно, что микрочастицы и технологическое волокно имеют различную величину электрокинетического потенциала поверхности. Подтверждением данного факта послужили исследования Л. Т. Казарович и Е. Г. Лобановой [49], которыми было установлено, что микроволокно тонкодисперсной фракции готового асбеста в основном представлено ломким асбестом, имеющим отрицательно заряженную поверхность.

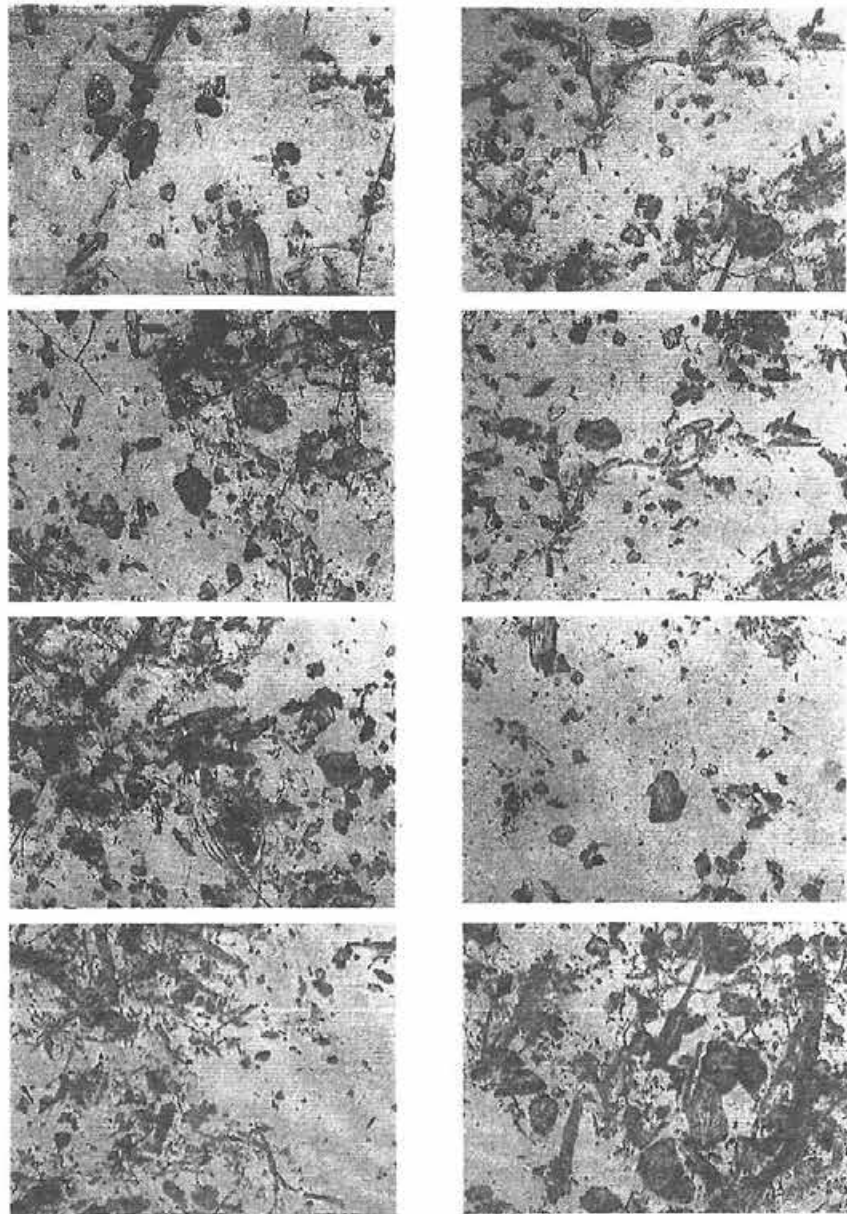


Рис. 4.5. Вид тонкодисперсной фракции просева

4.3. Транспортирование и перемешивание асбестового волокна и вмещающей породы

Исследования, проведенные В. С. Ясневым и Е. В. Пшеницыной в 1987-1989 гг. [50], показали, что процесс адсорбции тонкодисперсной фракции на асбестовом волокне в промышленных условиях в наибольшей степени происходит при транспортировании сухой руды после сушки до бункеров цеха обогащения через склады сухой руды.

При транспортировании через склад волокно адсорбирует более 10 % всей тонкодисперсной фракции, тогда как в пределах дробления ДСК – всего 3-4 %. Относительная доля адсорбированной тонкодисперсной фракции к общему приращению ее за весь цикл подготовки руды к обогащению в ЦО, по результатам опробования асбофабрики № 6 комбината «Ураласбест», составляет 45-55 %.

Моделирование в лабораторных и промышленных условиях процесса транспортирования сухой руды показало следующее. Процесс адсорбции тонкодисперсной фракции на асбестовом волокне связан только с близким контактом свежерасколотой поверхности пустой породы при обязательном образовании микрочастиц, но абсолютно не связан с контактом пыли с асбестовым волокном.

На рис. 4.6 приведена диаграмма прироста тонкодисперсной фракции в операциях транспортирования сухой руды. Первая колонка диаграммы показывает прирост тонкодисперсной фракции при транспортировании совместно исходной руды и свободного волокна. Вторая колонка показывает прирост тонкодисперсной фракции при совместном транспортировании руды, свободного волокна и продукта чернового концентрата сушки. Третья колонка показывает прирост тонкодисперсной фракции при совместном транспортировании руды, свободного волокна, чернового концентрата сушки и продукта выносов электрофильтров. Четвертая колонка диаграммы – это чистый черновой концентрат ДСК. На данном рис. 4.6, а, б, в представлены результаты трех экспериментов для содержания асбеста в руде соответственно, %: 0,52; 1,25; 2,80.

Из рисунка видно, что наибольший прирост содержания тонкодисперсной фракции, 38,9 %, происходит при транспортировке смеси руды и свободного волокна в пределах содержания последнего от 0,5 до 1,25 %. При содержании асбеста 2,8 % прирост ниже и составляет 19 %. То есть, как было отмечено ранее, адсорбция тонкодисперсной фракции происходит при интенсивном соприкосновении асбестовых волокон с минералом

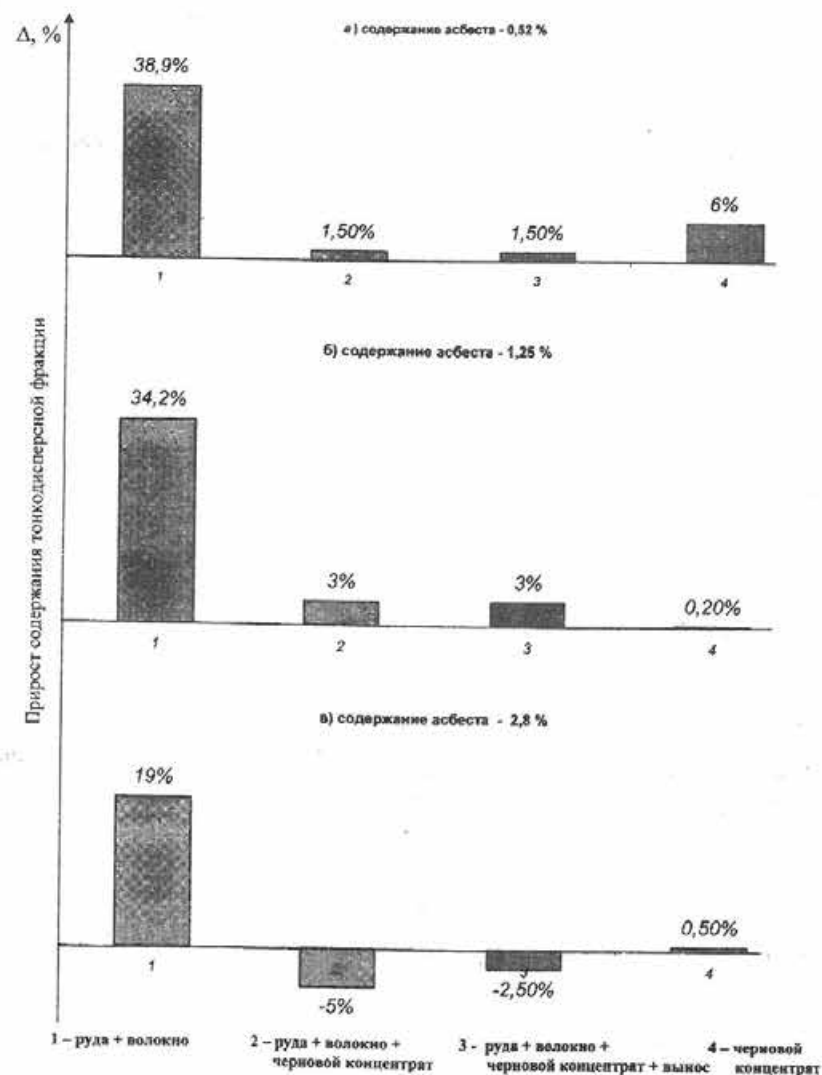


Рис. 4.6. Изменение содержания тонкодисперсной фракции в зависимости от продуктов контакта

пустой породы при частичном ее измельчении и образовании свежерасколотой поверхности. Причем прирост в данном случае составляет в среднем 30,7 %, что близко к теоретическим данным.

Добавление максимально возможного количества черного концентрата (8 % – столбик 2) при низком общем содержании асбеста дает прирост тонкодисперсной фракции всего на 1,5–3 %. Для смеси руды и асбестового волокна с высоким содержанием происходит даже снижение содержания тонкодисперсной фракции на 5 %. Это явление объясняется снижением общей поверхности контакта породы с волокном за счет увеличения контактов волокон между собой. Аналогично происходит процесс совместной транспортировки руды, черного концентрата ДСК и выноса электрофильтров (столбик 3). Здесь кроме увеличения поверхности контакта волокон между собой и частичного перехода тонкодисперсной фракции в пыль оказывает влияние заряд продуктов выносов после прохождения электроочистки.

Содержание тонкодисперсной фракции при отдельной транспортировке черного концентрата ДСК прирастает на 0,2–6 % (столбик 4), что в среднем незначительно влияет на общий процесс адсорбции тонкодисперсной фракции на асбестовом волокне во всех обогатительных переделах.

Сравнивая значения содержаний асбеста на рис. 4.6, а, б, в, есть основание считать, что при увеличении содержания асбеста в руде при ее транспортировке как отдельно, так и совместно с другими продуктами наибольший прирост содержания тонкодисперсной фракции на асбестовое волокно происходит при низком общем содержании асбеста в руде.

4.4. Резюме

На основании изучения поверхностных свойств асбестового волокна и минералов пустой породы, теоретических расчетов массы адсорбированной тонкодисперсной фракции на волокнистом агрегате и экспериментов по исследованию процесса транспортирования сухой руды можно сделать следующие выводы.

1. Образование тонкодисперсной фракции на асбестовом волокне зависит от природных свойств асбестового волокна и вмещающей породы, а именно от их поверхностных электрических свойств.

2. Тонкодисперсная фракция состоит из 80 % породных микрочастиц и 20 % микроволокна. Микроволокно адсорбируется в процессе взрывания, экскавации, транспортировки руды из рудника и дробления ее в ДСК.

3. Адсорбция микрочастиц породы на технологическом волокне происходит при соприкосновении свежерасколотой поверхности микро-

частицы породы с волокном и без разрушения зерен вмещающей породы малоэффективна.

4. Одним из факторов, влияющих на процесс адсорбции тонкодисперсной фракции, является содержание асбеста в руде: чем выше содержание асбеста в руде, тем меньше прирост тонкодисперсной фракции в асбестовом волокне.

5. ВОЗДУШНЫЕ МЕТОДЫ СНИЖЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ТОНКОДИСПЕРСНОЙ ФРАКЦИИ В АСБЕСТЕ

Знание принципов адсорбции тонкодисперсной фракции на асбестовом волокне позволяет разрабатывать, совершенствовать и обосновывать методы снижения ее содержания в процессе обогащения асбеста. На практике применяются методы снижения содержания тонкодисперсной фракции, основанные на отделении последней от волокна в процессе перемешивания на барабанных грохотах с применением воздуха. Такие методы называются воздушными.

Основными мерами, с помощью которых были достигнуты высокие показатели по снижению содержания тонкодисперсной фракции в асбесте, за последние годы явилось внедрение нового классифицирующего оборудования, использующего воздух, в линиях перемешивания. Была произведена замена российских и канадских асбестовых обеспыливателей АО-61 на барабанные классификаторы БК-1. Количество барабанных классификаторов, например, установленных в цехе обогащения № 1 асбестообогатительной фабрики ОАО «Ураласбест», за период с 1992 по 2002 гг. составило 94 штуки. Основным местом установки аппаратов БК являются конечные операции классификации, в которых получают готовые марки асбеста.

Практика эксплуатации аппарата БК-1 показала, что снижение содержания тонкодисперсной фракции за одну последнюю операцию классификации в среднем составляет 12–15 %, в то время как установленные в операциях ранее канадские и российские асбестовые обеспыливатели снижают тонкодисперсную фракцию соответственно на 2–5 и 5–8 %.

По используемому способу обогащения воздушные методы подразделяются на пневмомеханические и аэродинамические. К пневмомеханическому способу относятся:

– использование классификации в аппарате БК-1 в конечных операциях перемешивания;

– применение барабанных классификаторов БК-1 в голове перемешиваемого потока;

– организация «наддува» технологического воздуха в аппарат БК-1 наряду с отсосом.

Отделение тонкодисперсной фракции от волокна асбеста в воздуховоде посредством аэродинамической сепарации относится к аэродинамическому методу снижения ее содержания.

Для понимания механизма снижения содержания тонкодисперсной фракции в барабанном классификаторе важное значение имеют конструктивные особенности аппарата и скорость воздушного потока, требуемая для отделения частицы тонкодисперсной фракции от волокна. Практические данные, полученные В. В. Знаменским, показали, что данная скорость $V_{\text{воз}} = 24 \text{ м/с}$.

5.1. Конструктивные и технологические особенности барабанного классификатора БК-1

Конструкция барабанного классификатора приведена на рис. 5.1. Барабанный классификатор представляет собой круглый горизонтальный грохот – сетчатый барабан (2), внутри которого расположен ротор (3). Конструкция роторов у разных модификаций отличается конфигурацией жестко или шарнирно закрепленных лопаток (5), также могут использо-

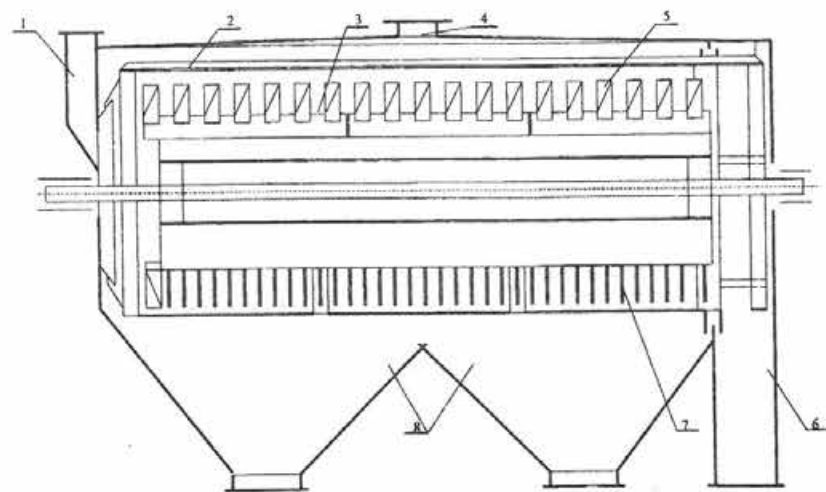


Рис. 5.1. Барабанный классификатор БК-1

ваться колки (гребенки 7). В барабанном классификаторе имеется загрузочное устройство (1), разгрузочные бункера для подрешетных (8) и надрешетных (6) продуктов. Характерной особенностью барабанного классификатора, используемого на асбестообогащительных фабриках, является организация отсоса воздуха из аппарата, который происходит через воздухопровод (4). Расход воздуха составляет 1,0–2,0 тыс. м³/ч.

К технологическим особенностям барабанного классификатора относится возможность реверсирования ротора с целью изменения качественных показателей выходящих продуктов. Используются режимы вращения барабана и ротора в одну сторону и противоположные стороны. Кроме того, эффективность классификации регулируется изменением размеров сит и скоростью отсоса воздуха.

5.2. Динамика процесса разделения асбеста в барабанном классификаторе

При разработке конструкции барабанного классификатора применительно к асбесту Л. Ф. Фоминых, В. Ф. Бердяевым и С. Ф. Савиной были проведены эксперименты по определению степени влияния различных параметров и режимов работы аппарата на конечные результаты классификации [51]. Результаты экспериментов показали, что на процесс снижения содержания тонкодисперсной фракции в асбесте в значительной степени влияют производительность по исходному продукту, скорость вращения ротора и направление вращения ротора и барабана. Увеличение расхода отсасываемого из барабана воздуха с 700 до 4500 м³/ч увеличивает выход выноса в аспирацию с 1 до 7,9 %, что приводит к значительным потерям асбеста.

Математическое описание процессов разделения частиц в барабанном грохоте в общем виде сделано Е. Ф. Цыпиным, В. З. Козиним, Ю. П. Морозовым и С. А. Ляпцевым [52]. Процесс разделения для отдельной частицы предполагает разбивку сечения рабочего пространства аппарата на зоны – сплошного материала; движения в воздухе вне круга, образованного вращением лопаток; движения в воздухе внутри круга, образованного вращением лопаток; движения по поверхности лопаток. Для каждой зоны определено уравнение движения частицы.

Характер просеивания определен как наброс и сдвиг. Основными силами, действующими при разделении, являются: центробежная, трения, инерции, в том числе и при ударе с лопатками ротора. Эlemen-

тарный акт просеивания и его результаты, а именно выход продуктов разделения и извлечение, рассчитываются с учетом поправочных коэффициентов на угол встречи частицы с лопаткой, размера отверстий сита, номера элементарного акта просеивания и т. д. Далее авторы предлагают алгоритм моделирования разделения материала в барабанном грохоте в зависимости от того, в какой зоне находится частица.

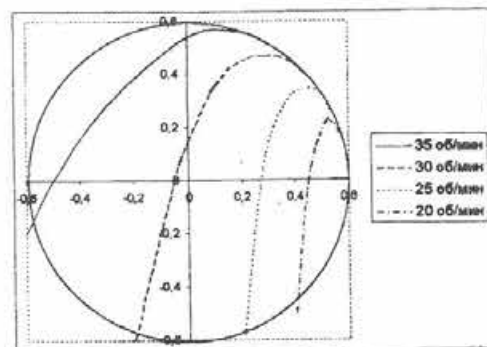


Рис. 5.2. Траектория движения

Для определения динамических характеристик барабанного классификатора для асбеста автором совместно со Знаменским В. В. [53] проведены эксперименты по определению фактического времени классификации асбеста 5-й группы в барабанном классификаторе.

Траектории движения асбестовых частиц при различных скоростях вращения барабана изображены на рис. 5.2. Вид траекторий движения частиц показывает, что в верхней части барабана частицы движутся свободным веером. При этом основными силами, действующими на частицы, являются силы тяжести, центробежная и сила инерции от удара лопатками. Сила воздействия воздушного потока при вращении барабана и ротора в одну сторону на паспортных воздушных режимах меньше, чем при обратном режиме, но достаточна для отделения от асбеста тонкодисперсной фракции. Фазирование ротора в обратную сторону приводит к созданию дополнительного вентиляторного эффекта от вращения лопаток или колков.

В нижней части поверхности барабана происходит процесс прохождения частицы асбеста через образованный слой материала и акт просеивания. Основными силами при этом являются центробежная и сила тяжести, а также в значительной степени сила сопротивления слоя. Частица асбеста крупностью менее размера отверстия сита, в том числе и частица тонкодисперсной фракции, просеивается через ситовую поверхность только в том случае, если она преодолевает силу сопротивления слоя материала на поверхности барабана. При этом в нижней части барабана, в образовавшемся слое, лопатки или колки на частицу не действуют.

Вращение ротора и барабана в одну сторону

На рис. 5.3, *a* изображена зависимость выхода просева от времени t нахождения продукта в барабане при вращении барабана и ротора в одну сторону. Зависимость имеет экстремум при времени нахождения продукта внутри барабана в течение 125 с и производительности 0,9 т/ч. По абсолютному значению t достаточно велико, и процесс просеивания неэффективен. Возрастание выхода просева до точки экстремума объясняется актом наброса волокна на сито. Далее, с увеличением времени нахождения материала в барабане происходит снижение выхода просева из-за необходимости преодоления сопротивления образовавшегося слоя материала на сите. На практике это подтверждается наличием на внутреннем слое сетки барабана так называемой «шубы».

Вращение ротора и барабана в разные стороны

Режим работы барабанного классификатора с вращением ротора и барабана в разные стороны характеризуется иной динамикой процесса. Величина слоя при таком режиме гораздо меньше, чем при режиме вращения в одну сторону, величина t очень мала и выход просеиваемого продукта в 1,6 раза больше. Выход выноса в аспирацию значительно возрастает по сравнению с режимом вращения барабана и ротора в одну сторону. Увеличение количества выноса составляет 1–3 %. На рис. 5.3, *б* изображена зависимость выхода просеиваемого продукта от времени нахождения материала внутри барабана для данного режима. Зависимость также имеет экстремум (41 с), до которого происходит акт наброса, но значительно более короткий, чем при вращении ротора в одну сторону с барабаном. С увеличением времени нахождения материала внутри барабана выход просеиваемого продукта также снижается, однако по абсолютному значению он значительно выше, чем при режиме вращения ротора и барабана в одну сторону.

Качество надрешетного продукта по содержанию тонкодисперсной фракции значительно лучше при режиме обратного вращения барабана и ротора, чем при вращении в одну сторону. Относительное снижение ее содержания по отношению к содержанию в исходном продукте в случае обратного вращения составляет 12–15 %, при вращении ротора и барабана в одну сторону – 5–10 %.

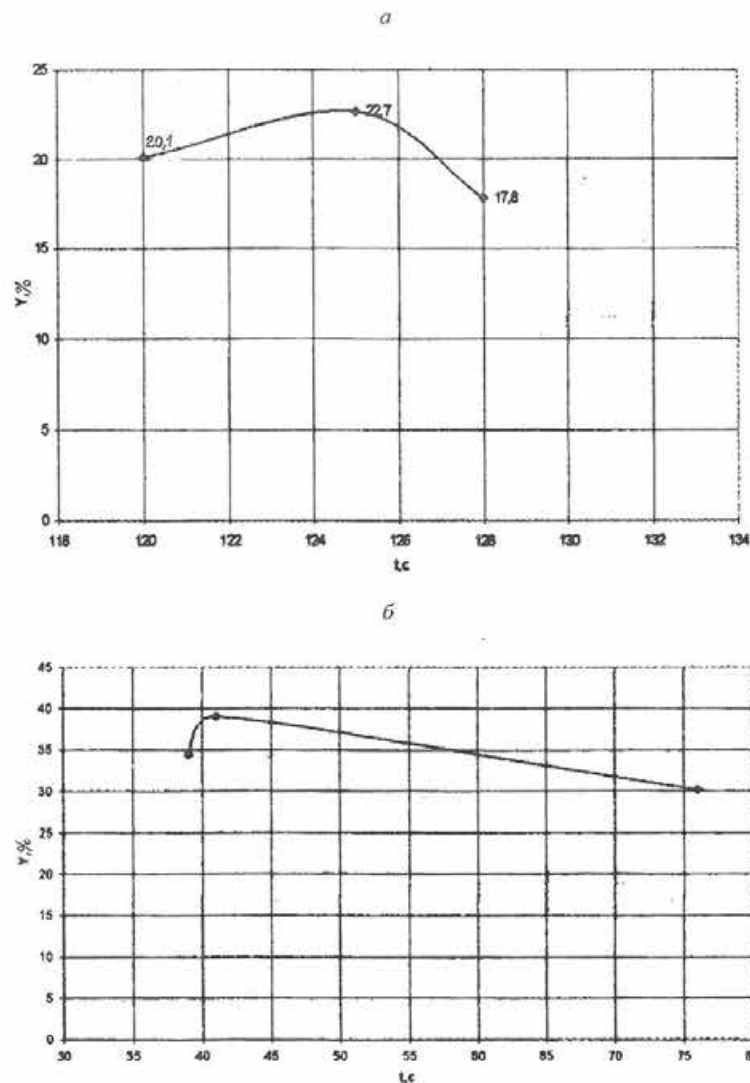


Рис. 5.3. Зависимость выхода просева от времени нахождения материала в барабане:
a – вращение в одну сторону; *б* – вращение в разные стороны

Различие в динамических режимах работы барабанного классификатора повсеместно используется для приготовления групп асбеста с заданной величиной содержания тонкодисперсной фракции путем изменения направления вращения ротора.

5.3. Практика снижения содержания тонкодисперсной фракции воздушным методом

Снижение содержания тонкодисперсной фракции путем установки барабанных классификаторов БК-1 последовательно в двух операциях в голове пересытного потока

Схема с установкой барабанных классификаторов в голове пересытки более пяти лет действует на одной из линий получения асбеста 5-й группы в ЦО № 1 ОАО «Ураласбест». На рис. 5.4 изображены старый *а*, и новый *б* варианты схемы. Ранее, после операции обезгаливания на грохоте ГИД-1500, были установлены рассевы РА-34, затем грохот ГИД-1500 для контрольного обезгаливания, и в последней операции – рассев ЗРМ. Данная линия в настоящее время существует на 1-2 секциях ЦО № 1 асбестообогатительной фабрики ОАО «Ураласбест». На новой линии рассевы РА-34 заменены на барабанные классификаторы БК-1 (далее БК), кроме того, отсутствует последняя операция классификации.

На рис. 5.5, 5.6 изображены графики изменения тонкодисперсной фракции и фракции +1,18 мм в линиях с установкой барабанных классификаторов в голове пересыточной линии и с установкой рассевов в данных операциях. Снижение содержания тонкодисперсной фракции по схеме с применением БК составило 26 %, в то время как по схеме с установкой рассевов – 9 %, при этом прирост содержания фракции +1,18 мм произошел соответственно на 18 % и 2 % абсолютных.

Высокая эффективность схемы с использованием аппаратов БК в начальных операциях пересытки объясняется многократным применением технологического воздуха как в аппарате БК, так и далее в грохоте ГИД-1500. Воздух является третьей гомогенной фазой, нахождение которой в промежутке между твердой фазой (частица) и поверхностной водой замедляет либо полностью останавливает процессы, происходящие в двойном электрическом слое. При этом микрочастица переходит в пыль, то есть становится самостоятельным агрегатом. Связи адсорбции разрываются.

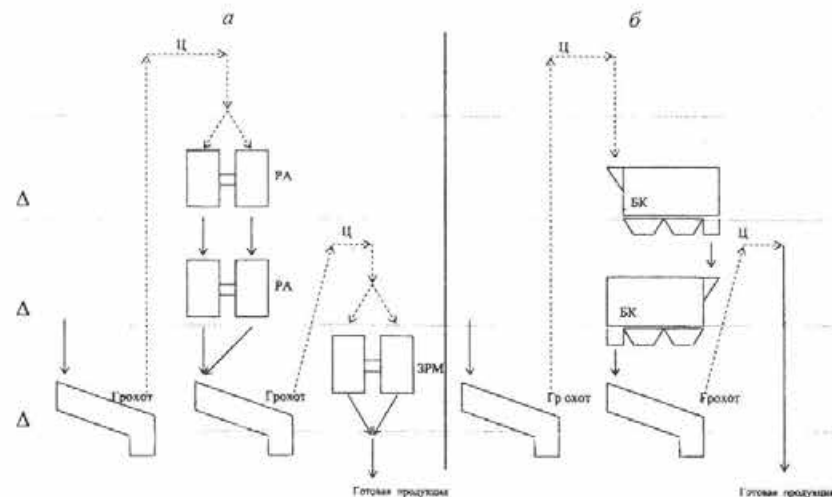


Рис. 5.4. Схема снижения тонкодисперсной фракции путем установки барабанных классификаторов БК-1 в голове пересытного потока

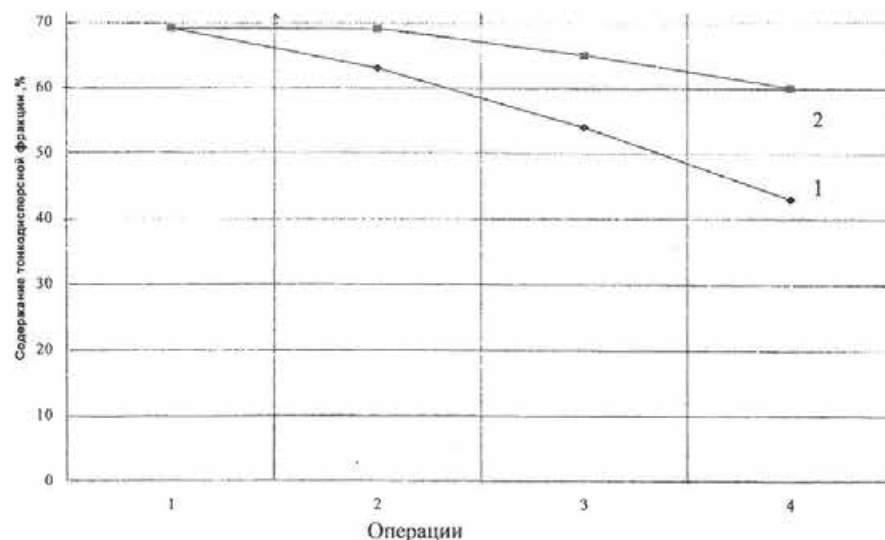


Рис. 5.5. Результаты снижения тонкодисперсной фракции по двум схемам: 1 – схема с БК; 2 – схема с РА

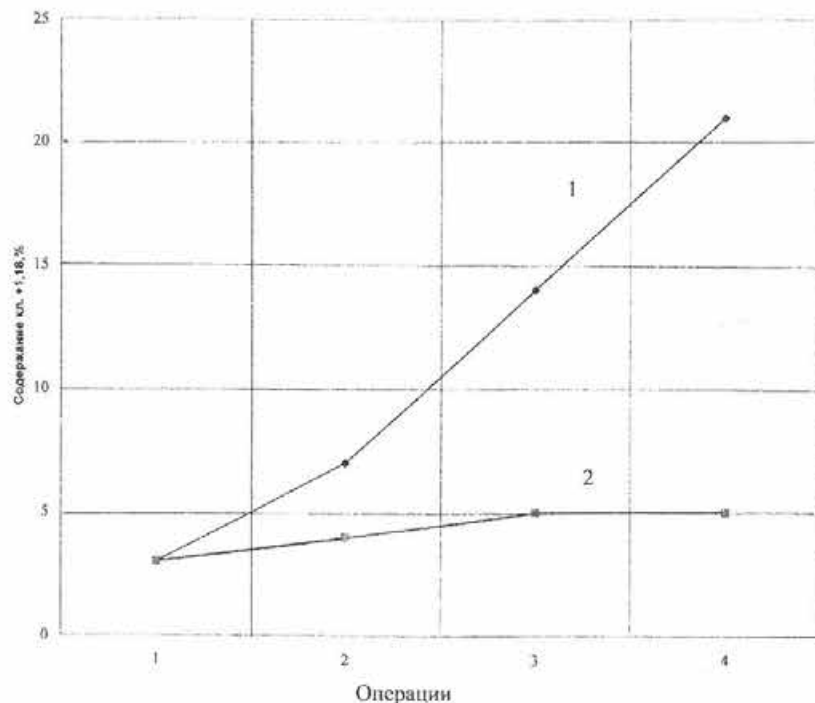


Рис. 5.6. Результаты сравнения увеличения класса +1,18 по схеме с БК (1) и схеме с РА (2)

Дополнительным фактором, присущим только данной схеме, является наличие в продукте значительного количества породных частиц — гали, которая отделяет волокна друг от друга. Частицы гали являются электронейтральными, поскольку зарядом обладают только свежерасколотые частицы породных минералов. В отличие от начальных операций пересортировки, где содержание гали составляет в среднем 9 %, в продуктах последних операций пересортировки содержание гали в среднем 0,8 % [54].

Схема с наддувом технологического воздуха в аппарат БК-1

В 1994 году на фабрике № 6 ОАО «Ураласбест» с целью повышения качества готовой продукции, а именно снижения содержания тонкодисперсной фракции в асбесте, было организовано поперечное продувание

рабочего пространства барабанных классификаторов, асбестовых и канадских обеспыливателей (далее — наддув). Группа исследователей, возглавляемая В. В. Знаменским [54, 55], провела ряд исследований и усовершенствований данного метода.

Результаты экспериментов показали, что организация наддува из централизованной системы пневмотранспорта не дала стабильных результатов по снижению содержания тонкодисперсной фракции. При этом средний расход воздуха через аппарат составил $6 \cdot 10^3$ м³/ч. Уровень снижения ее содержания за одну операцию с наддувом колебался от 3 до 23 %.

Исследования по изучению влияния наддува на степень снижения содержания тонкодисперсной фракции на отдельном стенде показали, что расход воздуха через установку значительно выше, чем в случае коллективного подключения наддува к централизованной системе пневмотранспорта, и составляет $14 \cdot 10^3$ м³/ч. Испытания на стенде выявили большую стабильность и эффективность работы установки по снижению содержания тонкодисперсной фракции по сравнению с режимом подключения к централизованной системе пневмотранспорта. Так, общее снижение содержания тонкодисперсной фракции за операцию при использовании наддува колеблется от 18 до 29 %, без использования наддува — 10–15 %.

На рис. 5.7 изображена зависимость эффективности снижения содержания тонкодисперсной фракции в аппарате БК с наддувом от количества используемого воздуха (давления в коллекторе стенда). Зависимость прямо пропорциональная.

Одним из важных вопросов при организации наддува в аппарат БК является вопрос экономической эффективности процесса, которая выражается в количестве потерь кондиционного волокна. За кондиционное волокно принято асбестовое волокно класса +0,075 мм по аппарату ПК-1А. В режимах без наддува потери кондиционного асбестового волокна составляют 4–10 %, а в режимах с наддувом — 7–20 %.

Также имеет большое значение для создания эффективного наддува в барабанном классификаторе подбор скоростей уноса частиц [51, 54]. В среднем скорость витания тонкодисперсной фракции V_v составляет 24 м/с. Для режимов разделения асбестового волокна в барабанном классификаторе без наддува скорость воздуха должна быть равна 3,5 м/с: частицы не уносятся в аспирацию и даже не витают.

На практике значения скоростей воздуха, необходимых для эффективной работы наддува, составляют 32–39 м/с. Количество продукта выноса в аспирацию при этом в 2–3 раза больше, чем без наддува техноло-

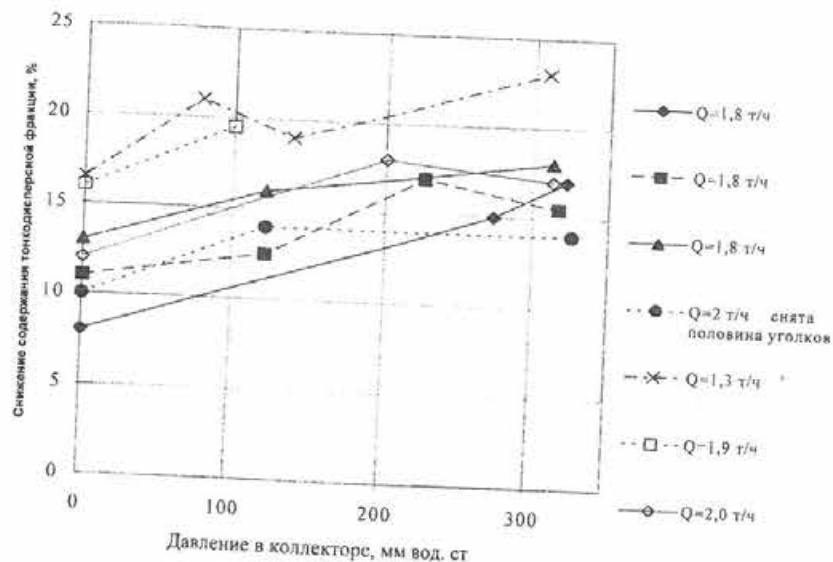


Рис. 5.7. Зависимость степени снижения тонкодисперсной фракции при наддуве от напора воздуха

гического воздуха, и составляет 3,0–3,2 % от исходного в аппарат продукта. С выносом теряется не только тонкодисперсная фракция, но и полезное асбестовое волокно.

Метод снижения содержания тонкодисперсной фракции с использованием наддува в аппарат БК может быть эффективно применен для разового подключения в случаях значительных колебаний качества исходной руды и волокна.

Определение тонкодисперсной фракции от волокна асбеста в воздухопроводах посредством аэродинамической сепарации

Аэродинамическая сепарация основана на том, что различные по крупности фракции разделяемого продукта по-разному ведут себя в воздушных потоках.

Замеры качества и количества проходящих по сечению воздухопроводов продуктов датчиками конструкции ЦНИИмаш [56] перед циклонами пред-

последней операции перечистки при различных сочетаниях горизонтальных и вертикальных участков труб показали, что в поперечных сечениях трубопроводов существуют зоны, заметно различающиеся количеством продукта и содержанием в нем тонкодисперсной фракции. Эти зоны обусловлены следующими сочетаниями отдельных участков горизонтальных и вертикальных труб:

- сразу после перехода трубопровода с вертикального участка на горизонтальный («вертикальный поворот») в верхней части потока образуется слой с повышенной плотностью концентрата и пониженным содержанием тонкодисперсной фракции;

- после длинного горизонтального участка трубопровода в нижней части трубы также образуется слой с повышенной плотностью концентрата и пониженным содержанием тонкодисперсной фракции.

Механизм образования зоны с пониженным содержанием тонкодисперсной фракции в верхней части потока после вертикального поворота связан с тем, что более жесткие волокна асбеста, на которых адсорбируется мало тонкодисперсной фракции, слабее увлекаются потоком воздуха, чем свободная тонкодисперсная фракция и распущенное волокно, и по инерции концентрируются около внешней по отношению к повороту стенки. Такое разделение названо центробежной воздушной сепарацией в трубопроводе (ЦВСТ).

Механизм образования зоны с пониженным содержанием тонкодисперсной фракции после длинного горизонтального участка связан с тем, что фракции разделяются локальными завихрениями воздуха, при этом жесткие нераспущенные волокна оседают на дно под действием силы тяжести, а свободная тонкодисперсная фракция и распущенные волокна асбеста за счет взаимодействия с воздухом распределяются по сечению более равномерно. Такое разделение волокна было названо гравитационной воздушной сепарацией в трубопроводе (ГВСТ).

Практическое использование описанных выше методов сводится к направлению продуктов из разных частей воздухопровода в разные циклоны с получением осажденных продуктов с разным содержанием тонкодисперсной фракции в асбесте. Для осуществления метода в трубопроводе устанавливаются специальные регулируемые перегородки – вкладыши.

В результате такого разделения разница в содержании тонкодисперсной фракции между двумя полученными продуктами в среднем составляет 12 %.

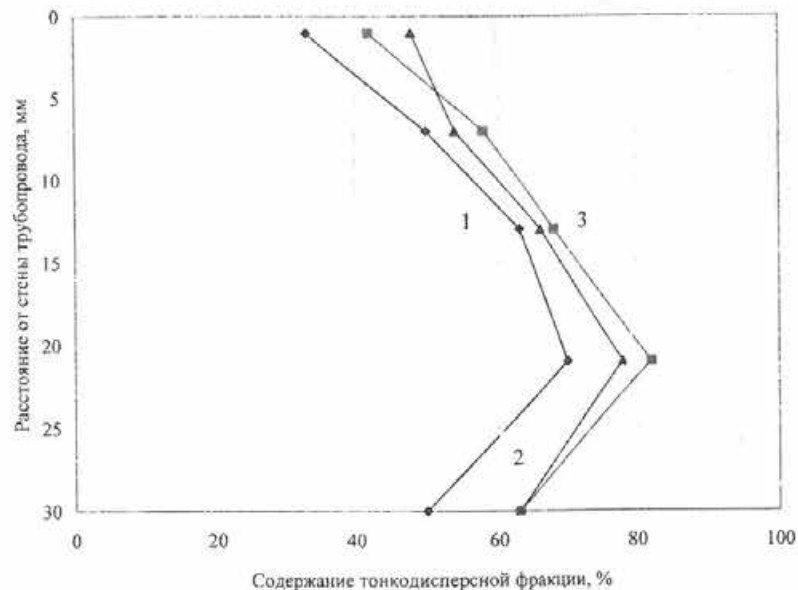


Рис. 5.8. Центробежная сепарация в воздуховоде, статистические данные замеров в разное время (1, 2, 3)

На рис. 5.8 изображен график изменения качества продуктов по сечению воздуховода в случае центробежной воздушной сепарации в трубопроводе на продуктах асбеста 6-й группы. Фактические результаты замеров содержания тонкодисперсной фракции в продуктах разделения при ГВСТ показывают, что средняя разница между ними составляет 14 %.

Зависимость эффективности разделения в воздуховоде от производительности обратно пропорциональная: чем выше производительность, тем ниже разница в содержании тонкодисперсной фракции в продуктах, поступающих в пару циклонов после разделения.

В настоящее время данный метод используется в ЦО-1 асбестообогащительной фабрики ОАО «Ураласбест» при получении асбеста 3, 4 и 5-й групп.

Воздушные методы снижения содержания тонкодисперсной фракции достаточно эффективны и разнообразны, однако они направлены на «борьбу» со следствием загрязнения асбестового волокна в процессе его обогащения. Эти методы были разработаны в расчете, что на фабрике уже

получен асбест, содержащий большое количество тонкодисперсной фракции, которую необходимо снизить.

Изучение механизмов адсорбции тонкодисперсной фракции в процессе переработки руды показало, что существует другой подход к проблеме ее снижения в готовых группах асбеста, а именно ненасыщение асбестового волокна тонкодисперсной фракцией при его обогащении и транспортировании.

5.4. Резюме

1. На асбестообогащительных фабриках для снижения содержания тонкодисперсной фракции в асбесте используют воздушные методы.

2. Основными аппаратами для реализации воздушного метода снижения содержания тонкодисперсной фракции в асбесте являются различные виды барабанных классификаторов.

3. Динамика процесса просеивания частицы тонкодисперсной фракции состоит в преодолении силы сопротивления слоя материала на поверхности барабана и различна для случаев вращения ротора и барабана в одну и разные стороны.

4. Воздушный метод снижения содержания тонкодисперсной фракции в условиях асбестообогащительных фабрик реализуется по следующим схемам:

- установкой барабанных классификаторов в голове или конце линии перемещения потока;
- введением наддува рабочего пространства барабанного классификатора;
- аэродинамической сепарацией в воздуховодах.

6. «НЕНАСЫЩЕНИЕ» АСБЕСТА ТОНКОДИСПЕРСНОЙ ФРАКЦИЕЙ: МЕТОДЫ И СХЕМЫ

Методами ненасыщения тонкодисперсной фракцией в асбесте являются такие методы, которые позволяют получать чистое асбестовое волокно в процессе переработки руды без введения специальных операций по отделению асбеста от тонкодисперсной фракции. Такими методами являются крупные схемные решения, направленные на исключение из технологического процесса аппаратов и узлов, в которых тонкодисперсная фракция образуется наиболее интенсивно, например, дробилок или склада сухой руды. На асбестообогащительных фабриках повсеместно

используется исключение попадания промежуточных продуктов, содержащих свободное асбестовое волокно, в вертикальные молотковые дробилки. В конечном итоге такое исключение позволяет снизить содержание тонкодисперсной фракции в черновых концентратах на 3,9–9,6 %, а в готовых группах асбеста на 8–12 %.

К методам ненасыщения тонкодисперсной фракцией асбеста относятся некоторые методы предварительного обогащения асбестовой руды. В схемах обогащения высокосортных асбестовых руд повсеместно используется операция предварительной классификации руды на «просевную» и рядовую. В «просеивной» руде концентрируется асбестовое волокно, что в дальнейшем способствует получению из нее асбеста с пониженным содержанием тонкодисперсной фракции.

Предварительное обогащение асбеста в процессе сушки – термоаэроклассификация – также является методом снижения содержания тонкодисперсной фракции в асбесте. Интенсификация воздушных режимов работы сушильных печей позволяет в значительной степени увеличить выход чернового концентрата сушки, последующая отдельная транспортировка и переработка которого дает возможность получения асбеста с низким содержанием тонкодисперсной фракции.

Магнитная сепарация асбестовой руды в ДСК направлена на доизвлечение скрытого асбестового волокна, попадающего в крупный шель. Однако увеличение доли скрытого асбестового волокна, имеющего низкое содержание тонкодисперсной фракции в руде, также снижает содержание тонкодисперсной фракции в готовой продукции в целом.

6.1. Раздельная обработка просевных и надрешетных продуктов грохотов после ДСК

Схемы, основанные на раздельной обработке просевных и надрешетных продуктов ДСК, используются при обогащении высокосортных асбестовых руд. Такие цеха имеются на двух горно-обогатительных асбестовых комбинатах – «Ураласбест» и «Туваасбест». Цель разделения руды в ДСК на просевную (высокосортную) и надрешетную (рядовую) – концентрация свободного асбестового волокна в просеивной руде для дальнейшего получения из нее асбеста 0–2-й групп. Как было рассмотрено в разделе 4, концентрация свободного асбестового волокна приводит к снижению содержания тонкодисперсной фракции в нем. Это нашло подтверждение в работе, проведенной В. А. Шалюгиной, А. И. Сычевой и

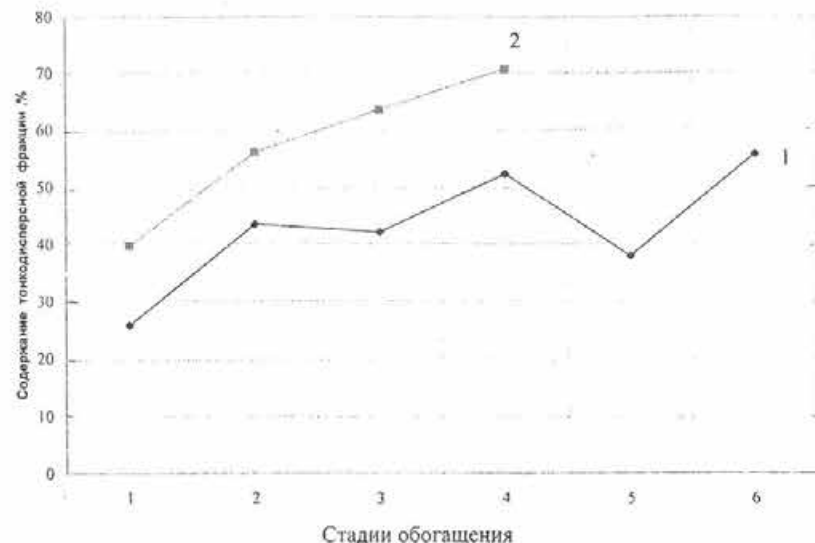


Рис. 6.1. Содержание тонкодисперсной фракции в волокне чернового концентрата I (1) и II секций (2) участка 2

Т. А. Николаевой [57], на примере асбофабрики № 4 ОАО «Ураласбест» (в настоящее время – участок № 2).

Исследования продуктов грохочения пруткового грохота 1-й секции ДСК при расстоянии между прутками в свету – 50 мм показали, что содержание тонкодисперсной фракции в асбестовом волокне просеивного и надрешетного продуктов составляет 31,4 и 42,9 % соответственно. Результаты анализа черновых концентратов по содержанию тонкодисперсной фракции при обработке просеивного продукта на 1-й секции ЦО и надрешетного продукта – на 2-й секции ЦО показаны на рис. 6.1. В среднем содержание тонкодисперсной фракции в черновых концентратах составляет 39,44 % по 1-й секции, и 59,63 % – по 2-й.

Концентрация асбестового волокна в просеивном продукте в начале процесса переработки руды, а именно в ДСК, позволяет иметь черновые концентраты, а значит и готовую продукцию с более низким содержанием тонкодисперсной фракции.

6.2. Предварительное обогащение асбеста в процессе сушки – термоаэроклассификация

В схемах обогащения канадских асбестообогатительных фабрик первый прием выделения черновых концентратов на грохотах с отсасыванием предусмотрен в ДСК.

В России на обогатительных фабриках существует узел обработки чернового концентрата шахтных сушилок. Качество данного концентрата низкое, содержание асбеста в нем находится на уровне 5–8 %, остальные 92–95 % составляет пылевая фракция. Выход чернового концентрата сушки колеблется от 0,5 до 3,0 т/ч на одну сушилку. Дальнейшая обработка концентрата позволяет получать асбест готовых групп повышенной чистоты, содержание тонкодисперсной фракции в котором составляет всего 12–20 %, при уровне ее содержания в остальной продукции 48–56 %.

Анализ работы узлов сушки и обработки чернового концентрата на производстве № 1 ОАО «Ураласбест», а также сравнение с результатами переработки асбестовой руды на установке термоаэроклассификации Института обогащения твердых горючих ископаемых (ИООТ) [58] показали принципиальную пригодность данного метода для предварительного обогащения асбестовой руды с выделением большого количества чернового концентрата. Выход чернового концентрата составил 20–30 % от исходного в сушку. Проведенные испытания показали значительную энергоемкость данного метода по сравнению с существующими шахтными сушилками, так как расход условного топлива при термоаэроклассификации на установке ИООТ в 2–4,8 раза больше расхода условного топлива на действующих шахтных сушилках за счет перегрева руды и больших теплопотерь с отработанным теплоносителем. Кроме того, удельный расход теплоносителя (горячего воздуха) на 1 т руды при термоаэроклассификации в 2–3 раза выше, чем в шахтных сушилках.

Как показали эксперименты, такой режим не дает гарантии получения сухой руды с требуемыми показателями влажности, которая в эксперименте с повышенным расходом горячего воздуха составила 2,43–2,9 % при нормативном показателе 1,6–1,8 %.

Более эффективной является организация прямоточной – противоточной подачи горячего воздуха в шахтную сушилку. Данный способ осуществляется с помощью байпаса, по которому горячий воздух из топки частично поступает в верхнюю часть сушилки, и наряду с этим подача горячего воздуха на сушку производится в нижнюю часть сушилки, как это

предусмотрено у базовых шахтных сушилок на асбестообогатительных фабриках.

На рис. 6.2 изображена схема модернизированной шахтной сушилки – термоаэроклассификатора асбестовой руды. Организация дополнительной подачи горячего воздуха через байпас создает условия для увеличения количества черновых концентратов за счет подготовки волокна к отсасыванию. Решающее значение здесь имеет объем теплоносителя, проходящего через сушилку. Наиболее эффективным при сравнительных испытаниях модернизированной шахтной сушилки № 1 – термоаэроклассификатора (производство 1 ОАО «Ураласбест») и базовых шахтных сушилок №№ 5 и 6 [61] оказался следующий режим:

	Сушилка № 1 с прямоточно-противоточным режимом сушки	Сушилка № 5 с противоточным режимом сушки
Производительность, т/ч	245	155
Выход концентрата, т/ч	28,2	2,7
Влажность исходного, %	3,5	3,7
Извлечение асбеста, %	56,2	11,5
Влагонапряжение, кг/м ³ ч	62,5	33,3
Расход топлива, м ³ /ч	480	350
Удельный расход тепла на испарение 1 кг влаги, ккал/кг	850,2	1162,4
Удельный расход топлива на сушку 1 т руды, м ³ /т	1,96	2,26
Эффективность сушки по испаренной влаге, %	52,5	41,8
Тепловой КПД, %	71,7	53,4
Температура теплоносителя в топке, °С	780	760
Расход теплоносителя, тыс. м ³ /ч	90,2	60,1

Эффект предварительного обогащения в модернизированной сушилке достигается с помощью организации прямоточно-противоточного режима сушки и увеличения расхода теплоносителя (горячего воздуха) в 1,5 раза по сравнению с базовыми шахтными сушилками. По результатам опробования черновых концентратов модернизированной сушилки их качество заметно улучшилось в сравнении с типовой штатной сушилкой. Содержание асбеста увеличилось до 11,5 %, содержание класса крупнее 4,8 мм по контрольному аппарату составило

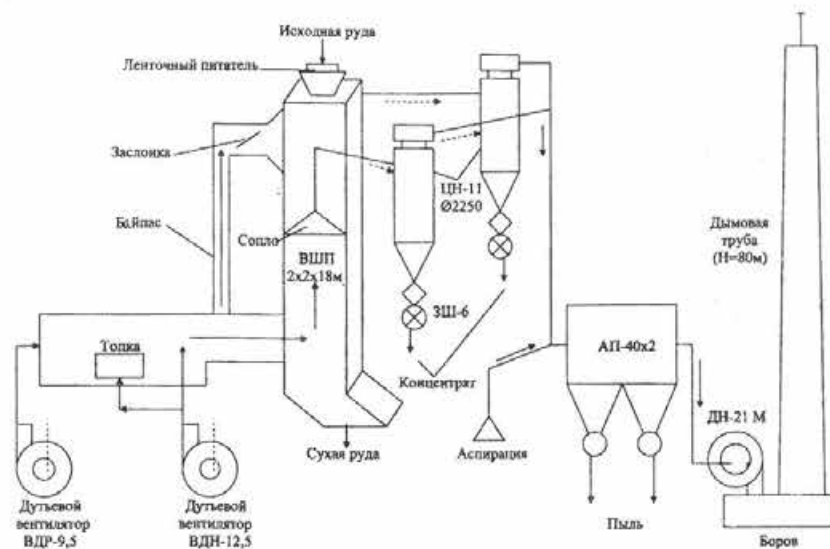


Рис. 6.2. Схема установки термоаэроклассификации

1,8 %, класса крупнее 1,35 мм – 5,2 %. Содержание тонкодисперсной фракции асбестового волокна черного концентрата сушки при этом составило 32 %.

6.3. Схемы обработки черновых концентратов сушки

На большинстве асбестообогатительных фабрик черновой концентрат сушки транспортируется и обрабатывается совместно с основным потоком руды. Существуют также отдельные схемы его обогащения, одна из них применяется на асбестообогатительной фабрике ОАО «Ураласбест». Основными недостатками данной схемы являются длинные цепочки классифицирующего оборудования по линиям и использование снятых с производства канадских обеспыливателей КАО-36”.

Группой авторов (Ионовым К. А и др.) на основании анализа технологии обработки черновых концентратов сушки, проведенных научно-исследовательских работ и авторского свидетельства № 371187 «Способ обработки продуктов выноса из сушильных печей при обогащении руд хризотил-асбеста (авт.: Смирнова Л. Я. и Васильева А. З.) [60] разработана технологическая схема обработки черного концентрата сушки (рис. 6.3).

Схема включает несколько операций грохочения без отсасывания и одну стадию классификации с получением готового продукта после распушки надрешетного продукта. Недостатком данной схемы является низкая эффективность разделения черного концентрата сушки на грохоте и малое число перечистных операций, которые не обеспечивают требуемого качества готовой продукции.

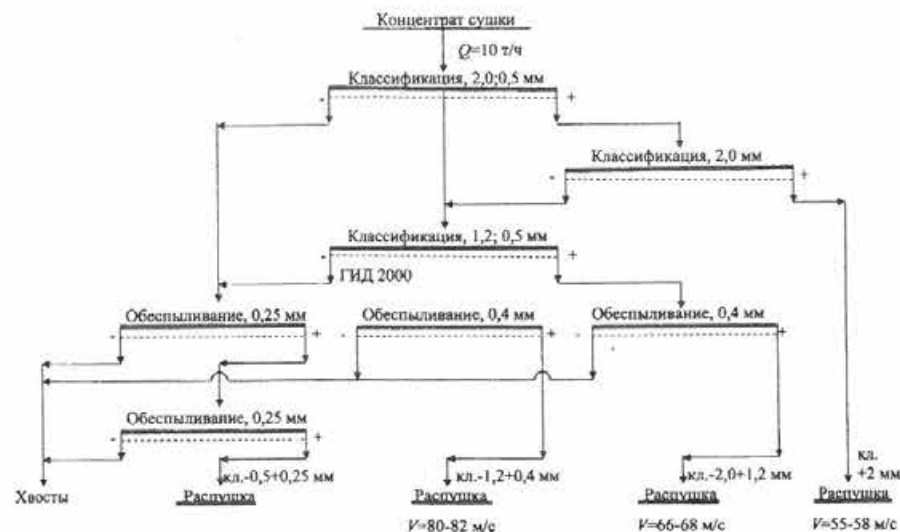


Рис. 6.3. Принципиальная схема обработки концентратов сушки

На основании опыта перечистки черновых концентратов сушки на действующих асбестообогатительных фабриках предложена схема обработки черного концентрата сушки с учетом модернизации сушилки и работы в режиме термоаэроклассификации (рис. 6.4).

Основными отличиями и преимуществами данной схемы являются следующие:

- короткие технологические линии перечистки с использованием барабанных классификаторов, обеспечивающих требуемое качество готовой продукции;
- направление основных просевных продуктов операций классификации в отдельный узел обработки;

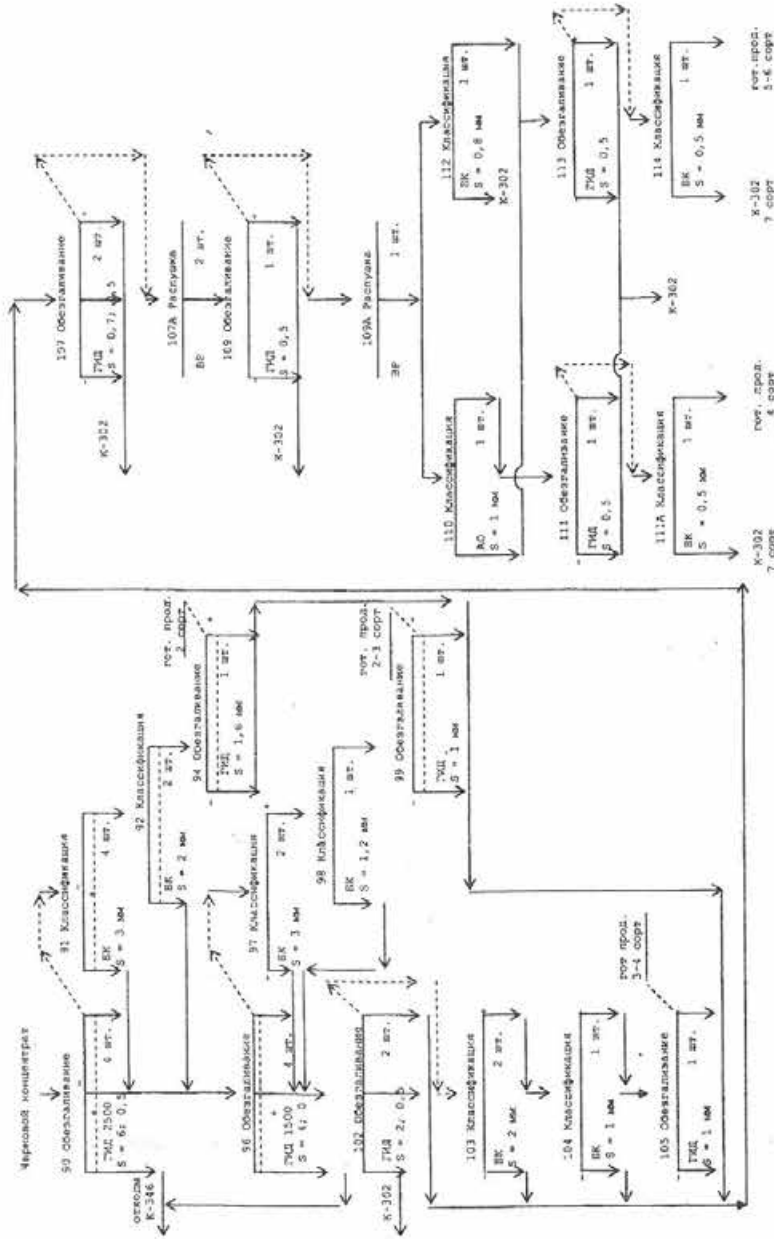


Рис. 6.4. Схема переработки черного концентрата термоаэроклассификации

- увеличение количества и улучшение текстуры асбеста готовых групп, получаемых из просевных продуктов, за счет введения двойной операции распушки в вентиляторных распушителях;
- получение готовой продукции в полном ассортименте - от 2-й до 7-й группы;
- содержание тонкодисперсной фракции в товарном асбесте, полученном по схеме, составляет 12-20 %.

Возможны и другие варианты схем.

К преимуществам метода термоаэроклассификации относится возможность независимого выпуска асбеста улучшенного качества с использованием отдельных линий и выработка асбеста рядового качества по основной схеме без ограничений по производительности. Все перечисленные факторы позволяют улучшить качество готовых групп асбеста, повысить технико-экономические показатели обогащительного передела и учесть требования потребителей.

6.4. Магнитная сепарация крупных фракций

Магнитная сепарация применяется в схемах обогащения асбестовой руды на канадских предприятиях (см. рис. 2.8) [61, 62, 63]. **Основной целью магнитной сепарации в схемах является доизвлечение скрытого асбестового волокна из крупных отходов.** На российских асбестообогащительных фабриках магнитная сепарация не используется. Патенты США и Франции, которые использованы при создании схем магнитного обогащения в Канаде, не приводят режимов работы магнитных сепараторов для асбестовой руды.

В 80-90-е годы прошлого столетия институтом «ВНИИпроектасбест» проводились исследования магнитной сепарации руды и крупных классифицированных отходов обогащения для Баженовского и Молодежного месторождений хризотил-асбеста [64, 65, 66, 67, 68]. Исследования проводились на магнитных сепараторах с верхней подачей материала. Исходным материалом служил щебень, вырабатываемый ДСК, дробленый продукт после III стадии дробления и различные классы крупности асбестовой руды.

Характер разделения асбестовых продуктов на магнитном сепараторе обусловлен наличием магнетита в них. Сравнительные результаты распределения содержания магнетита в различных фракциях крупности асбестовой руды показаны на рис. 6.5. На рис. 6.5 видно, что с увеличением крупности продукта содержание магнетита в нем увеличивается до опре-

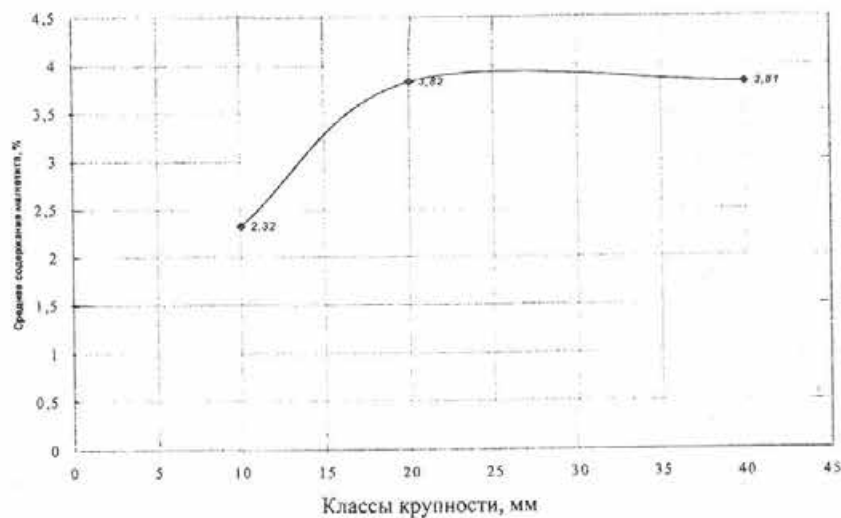


Рис. 6.5. Распределение магнетита по классам крупности в дробленом продукте 3-й стадии ДСК

деленного предела. Таким предельным классом крупности является класс +20 мм.

Подбор режимов магнитной сепарации для асбестовой руды имеет ведущее значение для эффективной работы сепаратора. Главным параметром при этом является напряженность магнитного поля, расчет которой для асбеста приводится впервые.

Напряженность магнитного поля сепаратора рассчитывается исходя из схемы сил, действующих на частицу.

Расчет напряженности магнитного поля

Схема сил, действующих на частицу асбестовой руды в сухом магнитном сепараторе с верхней подачей, изображена на рис. 6.6. Условие извлечения (притяжения) частиц через удельную магнитную силу, действующую на частицу, имеет вид:

$$\mu_0 \sigma \Delta H \geq \frac{1}{1 + \alpha_m} (4\pi^2 v^2 (R + 0,5d) - g \cos \alpha), \quad (6.1)$$

где $\mu_0 = 12,56 \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная; σ – удельная намагниченность частицы, равная произведению напряженности магнитного поля на магнитную восприимчивость частицы, Ам²/кг; $\Delta H = cH_0 e^{-cd}$, где H_0 – напряженность магнитного поля на поверхности барабана, кА/м; α_m – содержание магнетита в частице (доли единиц); d – размер частицы; $g = 9,8$ м/с² – ускорение свободного падения; α, v, R – угол, определяющий положение частицы на поверхности барабана; частота вращения и радиус барабана.

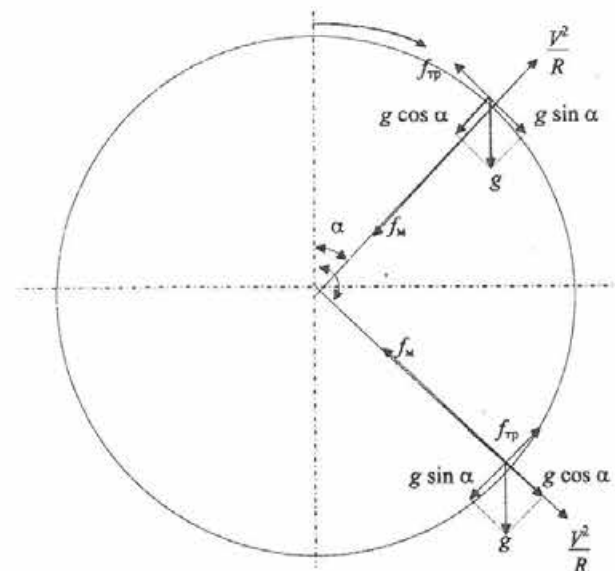


Рис. 6.6. Схема сил, действующих на частицу руды:

$f_m = \mu_0 \chi H \Delta H$ – удельная магнитная сила; V^2/R – центробежное ускорение; $g \cos \alpha$ и $g \sin \alpha$ – радиальная и касательная составляющие удельной силы тяжести; $f_{тр}$ – удельная сила трения

Как видно из рис. 6.6, радиальная составляющая силы тяжести $g \cos \alpha$ при углах $0 \leq \alpha \leq 90^\circ$ способствует, при $\alpha = 90^\circ$ не влияет ($\cos \alpha = 0$), а при $90^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$ препятствует притяжению частицы к барабану.

Угол, начиная с которого происходит отрыв немагнитных частиц от барабана под действием центробежной силы (в дальнейшем угол отрыва $\alpha_{от}$), рассчитывается при условии равенства радиальной составляющей силы тяжести и центробежной силы:

$$\alpha_{от} = \arccos 4\pi^2 v^2 R(1 - 0,5D/R) / g. \quad (6.2)$$

Значения угла отрыва при частотах вращения барабана 0,33–0,55 Гц (20–33 об/мин), которые соответствуют линейным скоростям на поверхности барабана 0,92–1,52 м/с, приведены ниже:

v , об/мин	20	22	25	27	30	33
V , м/с	0,92	1,0	1,15	1,24	1,38	1,52
$\alpha_{от}$, град	78-79	75-76	71-72	68-69	63-64	56-57

Для удержания на поверхности барабана асбестосодержащих частиц с примесью магнетита при углах, превышающих угол отрыва, необходимо наложить магнитное поле. Данные углы являются углами извлечения. При расчете напряженности магнитного поля сепаратора учитываются свойства асбестовых частиц, обусловленные присутствием зерен магнетита, удельная намагниченность которых приведена ниже (измерение осуществлялось на вибромагнитометре):

Напряжен. магнитного поля, Н, кА/м	8	16	24	40	56	80	120	240
Удельная намагниченность магнетита σ_m , Ам ² /кг	17,3	34,6	49,2	69,6	85,7	100	115	127

Учитывая, что $\sigma = \sigma_m \alpha_m$; $\Delta H = c H_0 e^{-cd}$ в центре частиц, где $c = \pi/S + 1/R$ – коэффициент неоднородности поля и S – шаг магнитной системы, и подставляя данные выражения в уравнение (6.2), получаем уравнение расчета необходимой для извлечения асбестовых частиц напряженности магнитного поля H_0 на поверхности барабана:

$$H_0 = \frac{4\pi^2 v^2 (R + 0,5d) - g \cos \alpha}{\mu_0 (1 + \alpha_m) \alpha_m \sigma_m e^{-cd}}. \quad (6.3)$$

Расчетные значения H_0 при типичных значениях $R = 0,44$ м; $S = 0,13$ м; $V = 1$ м/с приведены в табл. 6.1.

Графики зависимостей расчетной напряженности H_0 от содержания магнетита в извлекаемых частицах асбестовой руды, от угла и от размера частиц приведены на рис. 6.7, 6.8, 6.9. Как видно из них, зависимости расчетной напряженности H_0 от содержания магнетита и угла извлечения более значимы, чем от размера частиц.

Таблица 6.1
Расчетные значения напряженности H_0 для асбестовой руды, кА/м

α_m , %	90°					135°					180°			
	$d \cdot 10^{-3}$ м (мм)													
	0	6	10	20	40	0	6	10	20	40	0	10	40	
1	71	77	80	90	110	220	240	250	280	350	280	320	460	
2	45	48	50	56	67	120	130	135	150	185	150	170	240	
5	25,6	27	28	31	37	60	64	66	73	87	73	81	108	
10	17,2	18	19	20	24	38	40	41	45	53	45	49	63	

При уменьшении содержания магнетита в асбестовых частицах напряженность, необходимая для извлечения частиц, возрастает. Резкий рост напряженности наблюдается при содержании магнетита ниже 5 %, и особенно – ниже 2 %. При увеличении угла напряженность возрастает, постепенно выполаживаясь. Зависимость напряженности от крупности асбестовых частиц практически линейна.

Чтобы определить, частицы какой крупности, с каким содержанием магнетита и при каких углах будут извлекаться, на рис. 6.7–6.9 проводятся горизонтальные линии, соответствующие максимальной напряженности поля. Расчетные значения максимальной напряженности поля H_0 составляют: 80, 111, 143, 160, 176 и 200 кА/м.

Пересечение горизонтальных линий указанных напряженностей с кривыми рис. 6.7 дает значения минимального содержания магнетита, при котором частицы еще будут удерживаться на поверхности барабана (извлекаться). Значения указанной минимальной массовой доли магнетита при рассматриваемых углах и крупности представлены в табл. 6.2.

Таблица 6.2
Содержание магнетита в извлекаемых частицах, %, не менее

H_0 , кА/м/д мм	180°				135°			
	0	10	20	40	0	10	20	40
80	4,5	5,0	5,2	7,0	3,5	4,0	4,4	5,5
111	3,0	3,5	3,9	4,8	2,2	2,6	3,0	3,8
143	2,1	2,5	2,9	3,6	1,5	1,8	2,2	2,9
160	1,8	2,2	2,5	3,2	1,4	1,6	1,8	2,5
176	1,6	1,9	2,25	3,0	1,2	1,4	1,6	2,3
200	1,4	1,6	1,9	2,55	1,1	1,2	1,4	

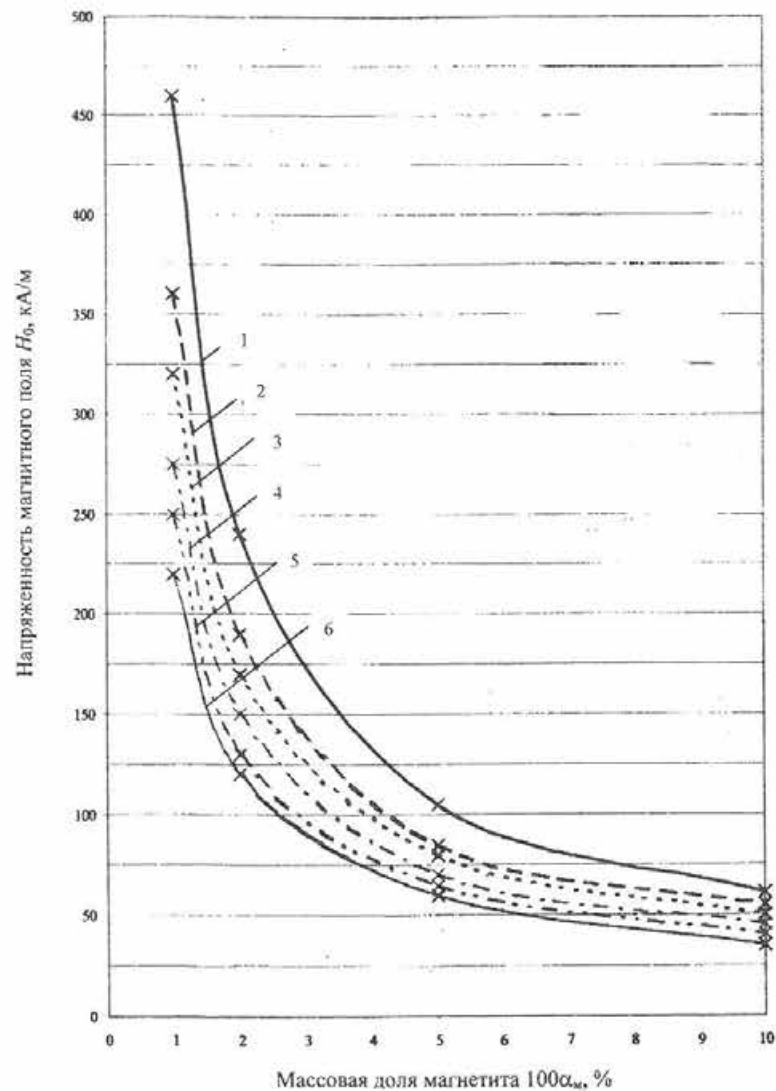


Рис. 6.7. Зависимость содержания магнетита от напряженности магнитного поля при разделении:
 1 – 180,40 мм; 2 – 180,20 и 135,40 мм; 3 – 180,10 мм; 4 – 180,0 и 135,20 мм;
 5 – 135,10 мм; 6 – 135,0 мм

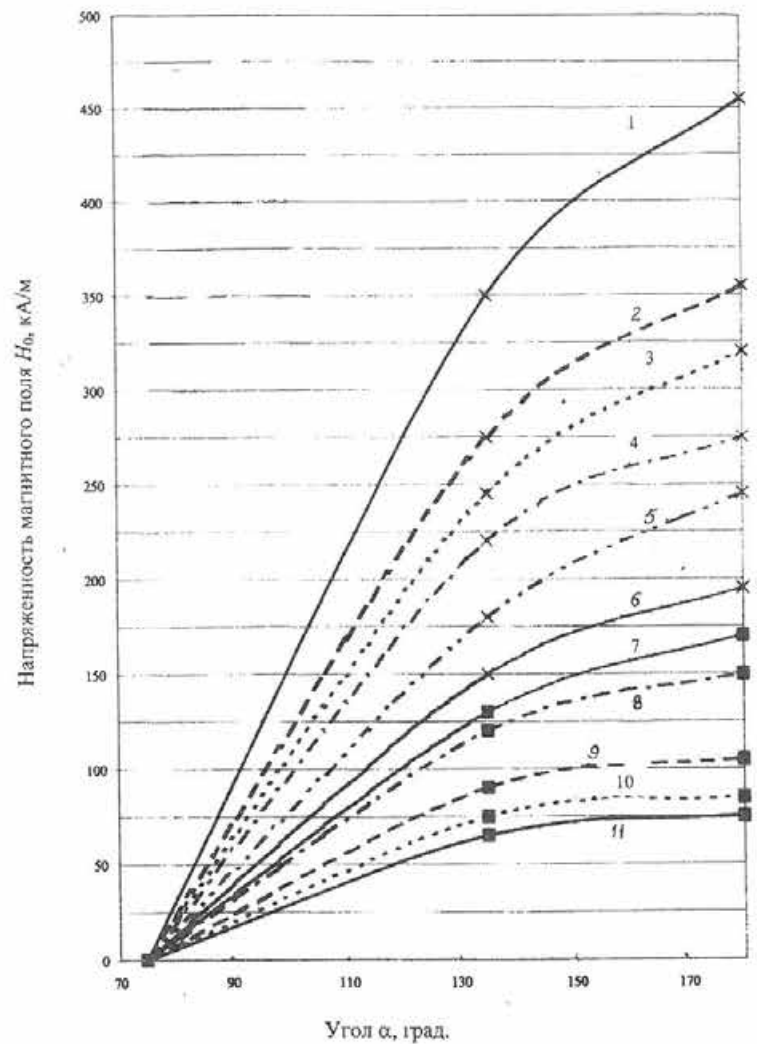


Рис. 6.8. Зависимость напряженности магнитного поля от угла извлечения:
 1 – 1%, 40 мм; 2 – 1%, 20 мм; 3 – 1%, 10 мм; 4 – 1%, 0 мм; 5 – 2%, 40 мм;
 6 – 2%, 20 мм; 7 – 2%, 10 мм; 8 – 2%, 0 мм; 9 – 5%, 40 мм; 10 – 5%, 20 мм;
 11 – 5%, 10 мм

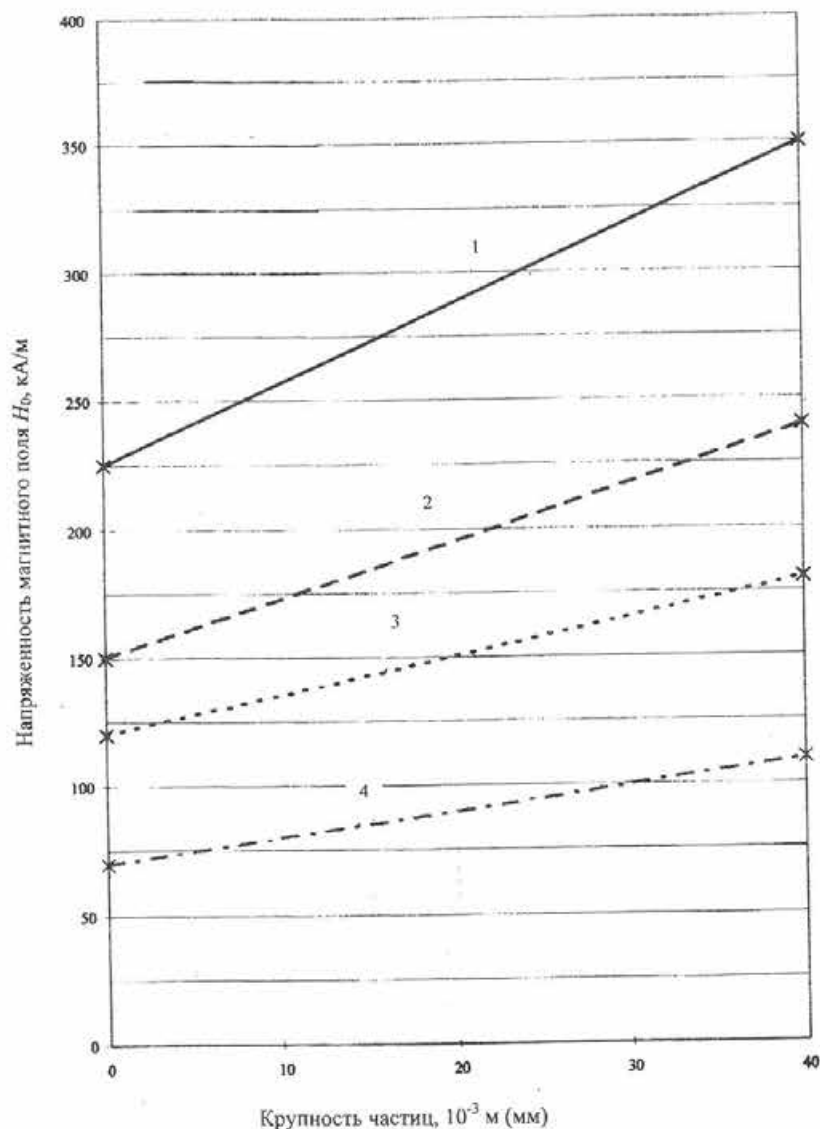


Рис. 6.9. Зависимость напряженности магнитного поля H_0 от размера частиц: 1 – 1 %, 135 мм; 2 – 2 %, 180 мм; 3 – 2 %, 135 мм; 4 – 1 %, 80 мм и 5 %, 180 мм

Пересечение горизонтальных линий напряженности с кривыми рис. 6.8 дает значения углов, при которых асбестовые частицы еще удерживаются на поверхности барабана (извлекаются). Значения данных углов извлечения при рассматриваемых содержаниях магнетита и крупности представлены в табл. 6.3.

Таблица 6.3

Углы извлечения частиц, градусы, не более

H_0 , кА/м/ d мм	$\alpha_m = 1\%$				$\alpha_m = 2\%$			
	0	10	20	40	0	10	20	40
80	92	90	88	86	107	102	98	94
111	99	96	93	90	127	118	112	104
143	108	103	100	95	165	144	131	116
160	113	108	103	98	X	163	143	123
176	118	111	106	100	X	X	159	131
200	121	118	112	104	x	x	x	

Примечание. Угол извлечения X не ограничен ($\geq 180^\circ$). Для $\alpha_m = 5\%$ угол извлечения не ограничен при всех рассматриваемых крупностях и напряженности магнитного поля более 80 кА/м.

Пересечение горизонтальных линий напряженностей с кривыми рис. 6.9 дает значения крупности асбестовых частиц, которые еще будут удерживаться на поверхности барабана (извлекаться). Значения указанной крупности извлекаемых частиц при рассматриваемых содержаниях магнетита и углах извлечения представлены в табл. 6.4.

Таблица 6.4

Крупность извлекаемых частиц, мм, не более

H_0 , кА/м/ <, град	$\alpha_m = 1\%$		$\alpha_m = 2\%$		$\alpha_m = 5\%$
	135	90	180	135	180
80	X	8	X	X	8
111	X	40	X	X	40
143	X	40	X	15	40
160	X	40	5	25	40
176	X	40	12	35	40
200	x	40	25	40	40

Примечание. X – при данных условиях частицы удерживаться не будут.

Расчеты показывают, что необходимая напряженность магнитного поля для извлечения частиц асбестовой руды и продуктов крупностью 40–0 мм, с содержанием магнетита не менее 2 % при самых неблагоприятных углах извлечения, 135–180°, колеблется от 120 кА/м (1500Э) до 240 кА/м (3000Э), в среднем составляя 160 кА/м (2000Э).

Таким образом, необходимая для реальных условий разделения асбестовой руды напряженность магнитного поля барабанного сепаратора с верхней подачей питания составляет 144–160 кА/м (1800–2000Э).

При снижении содержания магнетита в асбестовой руде до 1 % эффективное разделение ее на магнитную и немагнитную фракции возможно при повышении напряженности магнитного поля до 240 кА/м (3000Э) и выше или уменьшении крупности обогащаемого материала.

Тонкодисперсная фракция в асбесте магнитного и немагнитного продуктов

Исследования процесса магнитной сепарации асбестовой руды показали, что при выбранной напряженности магнитного поля разделение крупных классов (+10 мм, +20 мм, +40 мм) происходит эффективно. На рис. 6.10 показана разница по содержанию асбеста в магнитном и немагнитном продуктах.

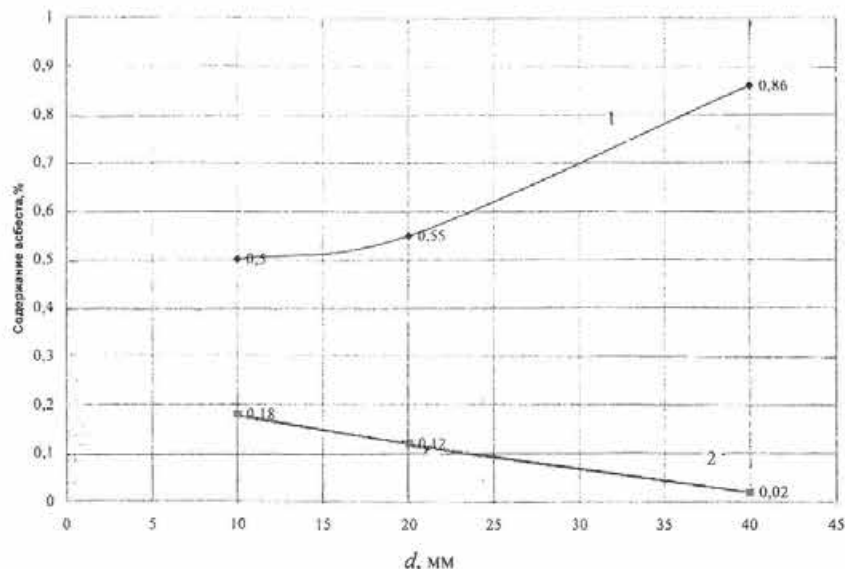


Рис. 6.10. Зависимость содержания асбеста от крупности при магнитной сепарации: 1 — магнитный продукт; 2 — немагнитный продукт

С увеличением крупности частиц асбестовой руды содержание асбеста в магнитном продукте увеличивается, а в немагнитном — уменьшается.

В асбесте магнитного и немагнитного продуктов также содержится различное количество тонкодисперсной фракции. На рис. 6.11 изображена разница в содержании тонкодисперсной фракции асбестового волокна при магнитной сепарации. В магнитном продукте в среднем содержание тонкодисперсной фракции выше на 8–9 %, чем в немагнитном.

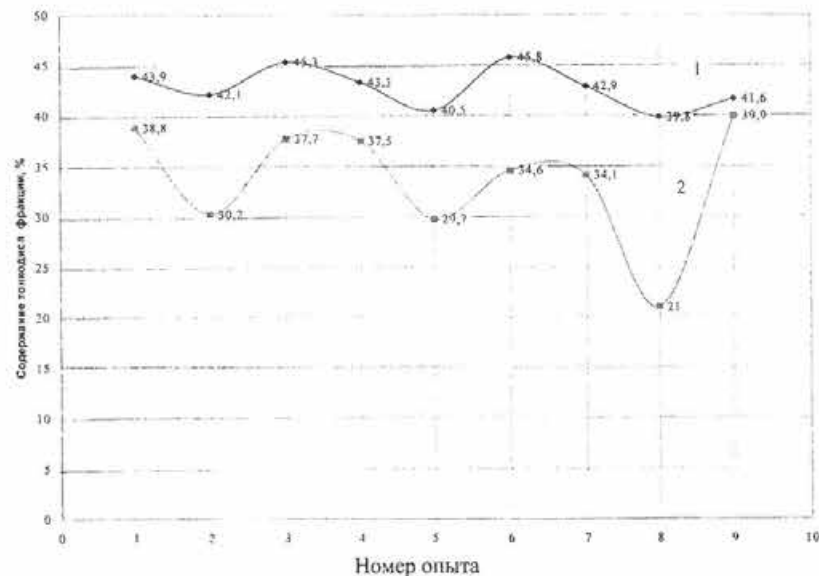


Рис. 6.11. Содержание тонкодисперсной фракции в магнитных (1) и немагнитных (2) продуктах после магнитной сепарации

Таким образом, использование магнитной сепарации позволяет:

- увеличить извлечение асбеста в асбестовую руду, поступающую на обогащение;
- выпускать щебень ДСК улучшенного качества за счет снижения в нем содержания асбеста;
- получать асбест с более высокими качественными характеристиками, а именно с более низким содержанием тонкодисперсной фракции.

1. Методами ненасыщения асбеста тонкодисперсной фракцией являются крупные схемные решения, направленные на исключение из технологического процесса аппаратов и узлов, в которых тонкодисперсная фракция образуется наиболее интенсивно, например, дробилок или склада сухой руды. К данным методам относятся: предварительная классификация руды на «просевную» и надрешетную, термоаэроклассификация, магнитная сепарация и др.

2. Концентрация асбестового волокна в просевном продукте в процессе предварительной классификации руды в ДСК позволяет иметь черновые концентраты и готовую продукцию с более низким содержанием тонкодисперсной фракции.

3. Термоаэроклассификация асбестовой руды в модернизированных сушилках разделяет исходный продукт на сухую руду, вынос и черновой концентрат, количество которого в 8–10 раз превышает количество черного концентрата при штатных режимах сушки. Содержание тонкодисперсной фракции в асбестовом волокне черного концентрата составляет 12–20 %.

4. Использование магнитной сепарации асбестовой руды позволяет:
- увеличить извлечение асбеста в асбестовую руду, поступающую на обогащение;
 - выпускать щебень ДСК улучшенного качества за счет снижения в нем содержания асбеста;
 - получать асбест с более высокими качественными характеристиками, а именно с более низким содержанием тонкодисперсной фракции.

7. МОКРОЕ ГРАВИТАЦИОННОЕ ОБОГАЩЕНИЕ АСБЕСТА В ГИДРОЦИКЛОНАХ

Мокрое гравитационное обогащение асбеста применяется для приготовления специальных видов асбеста, требующих высокой степени очистки асбестового волокна от примесей. Таким способом получают обезжелезненный асбест марок АХО–1 и АХО–2, содержание магнетита в которых не превышает соответственно 0,5 и 0,2 %. Наряду с очисткой от примесей происходит очистка асбеста от тонкодисперсной фракции.

Автором схем с применением гидроциклонов и руководителем исследований данного направления был В. М. Маркелов. Им исследован процесс мокрого обогащения асбеста в гидроциклонах [69], который внедрен на Анатолевском ГОКе для получения голубого и обезжелезненного асбестов. В институте «ВНИИпроектасбест» для этих целей разработана конструкция гидроциклонов диаметром 75 и 200 мм, учитывающих особенности формы асбестовых волокон (длинных цилиндров). Наиболее важным параметром для эффективного разделения асбеста и тонкодисперсной фракции в гидроциклоне является граничная крупность разделения.

7.1. Граничная крупность разделения

Под диаметром граничного зерна большинство исследователей [69–72] подразумевают диаметр такого бесконечно узкого класса, частицы которого поровну извлекаются в слив и пески. Для асбеста наиболее важным является определение наибольшего зерна в сливе, которое определяется по формуле Е. М. Гольдина и А. И. Поварова [70, 71]:

$$d = \frac{1,48d_n \sqrt{\mu}}{\varphi_x \sqrt{V_n h \cdot (\delta - \Delta)}}, \quad (7.1)$$

где d – диаметр наибольшего зерна в сливе, м; φ_x – коэффициент изменения окружной скорости, равный отношению скорости жидкости на радиусе сливного отверстия к скорости жидкости в точке питания; V_n – тангенциальная скорость жидкости в точке питания, м/с; h – высота внутреннего потока жидкости, равная 2/3 высоты конуса гидроциклона, м; δ и Δ – плотность частицы и среды, кг/м³; μ – вязкость среды, кг/мс.

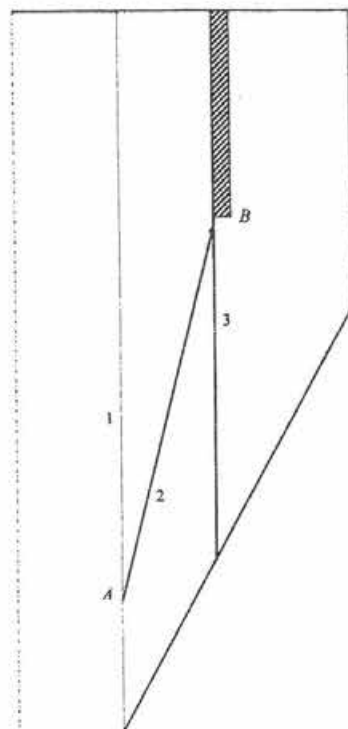


Рис. 7.1. Траектория движения граничного зерна во внутреннем потоке:
 A-B – траектория движения зерна;
 1 – воздушный столб;
 2 – внутренний поток;
 3 – внешний поток

частиц и линейного сопротивления среды. Фактически в гидроциклоне процесс разделения происходит в условиях как вязкостного, так и динамического сопротивления.

Для цилиндрической формы асбестового волокна и шарообразной формы породных частиц и тонкодисперсной фракции возможно рассчитывать их максимальные размеры в сливе следующим образом.

Общее сопротивление среды выражается уравнениями:

– для шарообразной формы

$$P = \Psi d^2 U^2 \Delta; \quad (7.4)$$

– для цилиндрической формы

$$P = \Psi d_1 l U^2 \Delta. \quad (7.5)$$

Экспериментально установлено [68]:

$$\varphi_x = \frac{V_c}{V_n} = 17,5 \frac{d_n^2}{d_c D} \alpha^{0,3}, \quad (7.2)$$

где V_c – тангенциальная скорость на радиусе сливного отверстия, м/с; α – угол конусности гидроциклона, рад.; d_n – диаметр песковой насадки, м; d_c – диаметр сливного патрубка, м; D – диаметр гидроциклона, м.

Скорость жидкости в точке питания

$$V_n = \frac{4Q}{\pi d_n^2}. \quad (7.3)$$

На рис. 7.1 изображена траектория движения граничного зерна во внутреннем потоке. За время, которое основной поток, уходящий в слив, пройдет путь h , зерна верхнего предела крупности, находящиеся в наиболее невыгодных условиях у границы воздушного столба, передвинутся до внешней границы внутреннего потока. Все рассуждения справедливы для шарообразной формы

Центробежные силы, приложенные к частицам, выражены следующими уравнениями:

– для шарообразной формы

$$C = \frac{\pi d^3 (\delta - \Delta) V_t^2}{6r}; \quad (7.6)$$

– для цилиндрической формы

$$C = \frac{\pi d_1^2 l (\delta - \Delta) V_t^2}{4r}, \quad (7.7)$$

где d – диаметр эквивалентного шара, м; d_1 – диаметр цилиндра, м; l – длина цилиндра, м; Ψ – коэффициент сопротивления среды; U – радиальная составляющая скорости движения частицы, м/с; V_t – тангенциальная составляющая скорости движения частицы, м/с; r – радиус движения частицы, м.

При равновесии центробежных сил с силами сопротивления среды выражения (7.4) и (7.6), (7.5) и (7.7) уравниваются между собой.

Радиальная составляющая скорости движения частицы U является переменной величиной, зависящей от радиуса:

$$U = \frac{dr}{dt}. \quad (7.8)$$

Тангенциальная составляющая скорости движения частицы V_t также является переменной величиной, она изменяется по радиусу r_0 (радиус воздушного столба) до r_c (радиус сливного отверстия). Для упрощения V_t обычно принимают за постоянную величину [71].

Коэффициент сопротивления среды Ψ зависит от формы частицы и критерия Рейнольдса Re . Результаты экспериментов показали, что разделение асбестовых частиц в гидроциклонах происходит в пределах чисел Рейнольдса от 0 до 20. С достаточным запасом для практических расчетов можно определить диапазон Re – от 0,5 до 30. При этом коэффициент сопротивления среды можно записать:

– для шарообразной формы

$$\Psi = 13,9 \cdot Re^{-0,7}; \quad (7.9)$$

– для цилиндрической формы

$$\Psi = 9,2 \cdot Re^{-0,6}. \quad (7.10)$$

Критерий Рейнольдса в центробежном поле разделения имеет вид:

– для шарообразной формы

$$Re = \frac{U d \Delta}{\mu}; \quad (7.11)$$

– для цилиндрической формы

$$Re = \frac{2U d_1 \Delta}{\mu}. \quad (7.12)$$

Различия в расчете числа Рейнольдса для шарообразных и цилиндрических частиц доказаны экспериментальным путем Г. С. Бергером и В. М. Маркеловым [72] и основаны на его зависимости от коэффициента сопротивления среды и формы частицы.

Решая уравнение (8.2) относительно времени, приняв $r_0 = 0,6r$ и проинтегрировав полученные выражения, время движения частиц граничной крупности от воздушного столба до внешней границы внутреннего потока можно определить:

– для шарообразной формы

$$t = 1,2 \frac{\mu^{0,54} \Delta^{0,23} d_c^{1,77}}{d^{1,31} (\delta - \Delta)^{0,71} \varphi_x^{1,43} V_n^{1,43}}; \quad (7.13)$$

– для цилиндрической формы

$$t = 0,45 \frac{\mu^{0,43} \Delta^{0,28} d_c^{1,71}}{d_1^{1,14} (\delta - \Delta)^{0,71} \varphi_x^{1,43} V_n^{1,43}}. \quad (7.14)$$

Время движения частиц граничной крупности от r_0 до r_c равно времени пребывания жидкости во внутреннем потоке. Вертикальная скорость внутреннего потока V_z определяется по объемной производительности гидроциклона по сливу Q_c и площади поперечного сечения внутреннего потока:

$$V_z \approx 2 \frac{Q_c}{d_c^2}. \quad (7.15)$$

Время движения жидкости во внутреннем потоке:

$$t = \frac{h}{V_z} = 0,5 \frac{hd_c^2}{Q_c}. \quad (7.16)$$

Решая совместно уравнения (7.13), (7.14) и (7.15) и учитывая, что, по данным А. И. Поварова [70], объемная производительность гидроциклона по питанию Q и производительность гидроциклона по сливу Q_c выражаются формулами:

$$Q = 6d_n d_c \sqrt{qH}; \quad (7.17)$$

$$Q_c = Q \left(1,1 - 0,45 \frac{d_n}{d_c} \right); \quad (7.18)$$

расчетные формулы для определения диаметров наибольших частиц в сливе:

$$d = 1,94 \frac{\mu^{0,41} \Delta^{0,17} Q_c^{0,76}}{d_c^{0,18} (\delta - \Delta)^{0,59} \varphi_x^{1,18} V_n^{1,18} h^{0,76}}; \quad (7.19)$$

$$d_1 = 1,91 \frac{\mu^{0,38} \Delta^{0,25} Q_c^{0,88}}{d_c^{0,25} (\delta - \Delta)^{0,62} \varphi_x^{1,25} V_n^{1,25} h^{0,88}}. \quad (7.20)$$

Чтобы на практике использовать теоретические расчеты граничной крупности асбестовых частиц, опытным путем производится подбор режимов мокрого гравитационного обогащения, на основании которого осуществляется разработка технологии.

7.2. Технология мокрого обогащения асбеста

Схемы мокрого гравитационного обогащения в гидроциклонах включают операции перемешивания асбестового волокна с водой, перечистки в гидроциклонах, дешламации слива и песков и сушки готовой продукции. Важным моментом является подбор режимов работы гидроциклонов и определение количества стадий перечистки. Исходным продуктом для мокрого обогащения служит асбест готовых групп.

Основными параметрами гидроциклона являются:

- соотношение твердого к жидкому при приготовлении пульпы;
- давление пульпы на входе;
- размеры гидроциклона (диаметр, соотношение цилиндрической и конической частей);
- размеры песковой насадки.

Определение данных параметров направлено на вычисление коэффициента изменения окружной скорости φ_x для условий разделения асбестовых волокон и породных зерен.

В институте «ВНИИпроектасбест» проводились экспериментальные исследования, которые позволили определить данные параметры. В качестве оптимальных определены:

- значение Т:Ж = 1:25,
- размеры песковых насадок для гидроциклона диаметром $D = 75$ мм – 0,012–0,016 м;
- размеры песковых насадок для гидроциклона диаметром $D = 200$ мм – 0,020–0,028 м.

Для асбестового волокна постоянными являются следующие показатели: плотность частицы $\Delta = 2600 \text{ кг/м}^3$, вязкость воды $\mu = 0,1 \cdot 10^{-2} \text{ кг/мс}$, плотность воды $\delta = 1000 \text{ кг/м}^3$.

Эксперименты позволили путем подстановки фактических данных в формулы определить значения расчетных максимальных диаметров частиц для асбеста.

Подставляя значения H , d_n , d_c в уравнения (7.17), (7.18), определяют Q и Q_c , затем по формуле (7.3) — V_n . Диаметр максимального зерна в сливе определяется по гранулометрическим характеристикам слива. Значение ϕ_x находится подстановкой вычисленных и заданных значений в уравнение (7.1). Значения ϕ_x для разделения асбестового волокна составляют: 0,83 для $D = 75 \text{ мм}$; 1,06 для $D = 200 \text{ мм}$.

Уравнения (7.19), (7.20) можно значительно упростить для гидроциклонов заданных конструктивных параметров H , d_n , d_c , сильно разжиженной пульпы, каковой является асбестовая пульпа (Δ , $\mu = \text{const}$), и постоянных значений плотности породных и асбестовых зерен, которые составляют соответственно 2600 и 2900 кг/м^3 . Упрощенные уравнения имеют вид:

Для гидроциклона $D = 75 \text{ мм}$

$$d = 0,0048 \frac{\left(1,1 - 0,45 \frac{d_n}{d_c}\right)^{0,76}}{H^{0,21}}; \quad (7.21)$$

$$d_1 = 0,00245 \frac{\left(1,1 - 0,45 \frac{d_n}{d_c}\right)^{0,88}}{H^{0,19}}. \quad (7.22)$$

Для гидроциклона $D = 200 \text{ мм}$ d и d_1 также определяются по формулам (7.21) и (7.22) с изменением коэффициента перед дробью соответственно на 0,0065 для d и 0,0033 — для d_1 .

Справедливость формул (7.21) и (7.22) в значительной мере зависит от того, в каком режиме проходит процесс разделения асбестового волокна: турбулентном, ламинарном или переходном. Режим определяется критерием Рейнольдса. Исследованиями, проведенными на асбестовом волокне, установлено [72, 73]: наиболее приемлемым для асбеста является графический метод определения $\Psi = f(\text{Re})$ [74].

Проверка справедливости используемых формул осуществляется путем определения различных значений d и d_1 при различных значениях H и d_n . Данные проверки приведены в табл. 7.1. Результаты расчета показы-

вают, что при различных насадках и напорах питания движение зерен граничного размера во внутреннем потоке гидроциклона испытанной конструкции происходит в пределах $1 < \text{Re} > 20$, следовательно, принятые при расчете допущения справедливы.

Таблица 7.1

Расчетные значения параметров Рейнольдса, диаметров и средних радиальных скоростей движения частиц граничной крупности во внутреннем потоке гидроциклонов

Давление на выходе, 10^4 Па	d , мк U , м/с Re	$D = 75 \text{ мм}$				$D = 200 \text{ мм}$			
		$d_n = 1,0 \text{ см}$		$d_n = 1,8 \text{ см}$		$d_n = 1,6 \text{ см}$		$d_n = 2,8 \text{ см}$	
		волокно	породные частицы	волокно	породные частицы	волокно	породные частицы	волокно	породные частицы
0,5	d	26	52	22	45	36	71	32	63
	U	10,0	10,0	7,3	7,3	13,0	13,0	11,9	11,9
	Re	5,2	5,2	3,2	3,2	9,2	9,2	7,5	7,5
1,0	D	23	45	19	39	31	62	28	55
	U	14,0	14,0	19,8	19,8	19,3	19,3	16,4	16,4
	Re	6,2	6,2	4,2	4,2	12,0	12,0	9,0	9,0
2,0	D	20	39	17	34	27	53	24	48
	U	20	20	15	15	24,5	24,5	23	23
	Re	8,0	7,5	5,1	5,1	13,0	13,0	11,0	11,0
4,0	d	18	34	15	29	23	46	21	41
	U	26,5	26,5	23,8	23,8	34,8	34,8	29,3	29,3
	Re	9,2	9,0	6,8	6,9	16,0	16,0	12,0	12,0

Подстановкой фактических значений d и d_1 для асбестовых волокон и породных частиц, а также частиц магнетита найдены оптимальные диаметры песковых насадок и сливных патрубков. Таким образом, рассчитываются параметры гидроциклона для пересортировки асбестового волокна от породных частиц и магнетита. Для расчета конструктивных параметров гидроциклона, который предназначен для пересортировки операции по снижению тонкодисперсной фракции, d_1 остается таким же, как в предыдущем случае, а за d принимается средний размер микрочастиц тонкодисперсной фракции. Количество стадий пересортировки также определяется опытным путем с учетом степени очистки асбестового волокна за одну стадию.

Эксперименты и практика эксплуатации гидроциклонов показали, что в зависимости от конструктивных размеров и размеров песковых и сливных отверстий при обогащении асбеста они могут использоваться для различных целей. При выработке обезжелезенного асбеста применя-

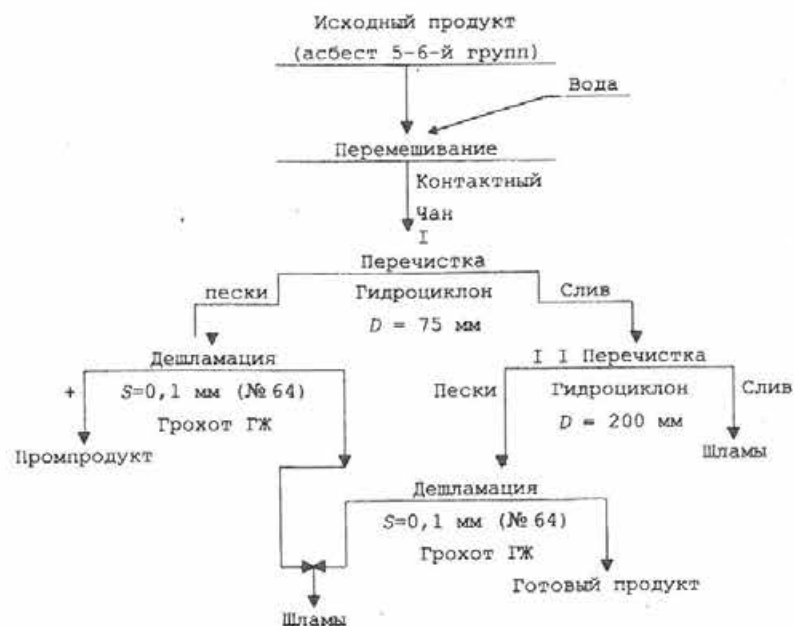


Рис. 7.2. Схема снижения тонкодисперсной фракции в асбесте мокрым гравитационным методом

ются в основном гидроциклоны диаметром 75 мм. Они отделяют породные частицы пыли и магнетита из асбеста. При этом тонкодисперсная фракция уносится вместе с асбестовым волокном. Перечистка слива в гидроциклоне диаметром 200 мм позволяет выделять в слив тонкодисперсную фракцию. На рис. 7.2 изображена схема получения асбеста с низким содержанием тонкодисперсной фракции мокрым гравитационным способом. Реализация схемы на асбесте 5-й группы позволяет снижать содержание тонкодисперсной фракции с 50–56 до 16–25 %.

7.3. Резюме

1. Мокрое гравитационное обогащение асбеста применяется для приготовления специальных видов асбеста, требующих высокой степени очистки асбестового волокна от примесей и тонкодисперсной фракции.

2. Для асбеста наиболее важным является определение размера наибольшего зерна в сливе, который может быть рассчитан теоретически.

3. Схемы мокрого гравитационного обогащения в гидроциклонах включают операции перемешивания асбестового волокна с водой, перечистки в гидроциклонах, дешламации слива и песков и сушки готовой продукции.

4. Реализация мокрого гравитационного метода на асбесте 5-й группы позволяет снижать содержание тонкодисперсной фракции с 50–56 до 16–25 %.

8. ПРИНЦИПЫ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ГОТОВОЙ ПРОДУКЦИИ

К технологическим принципам управления относятся такие систематизированные приемы регулирования качества, которые позволяют с помощью технологических средств достигать заданного качества готовой продукции в заданное время.

В России при обогащении асбеста для получения готовой продукции заданного качества используется метод технологического перераспределения количества продуктов.

В настоящее время на обогатительных фабриках оперативное управление качеством готовой продукции производится с помощью регулирования производительности поступающего в процесс исходного продукта, изменения регулируемых параметров обогатительного аппарата – размеров сит, скорости используемого воздуха и т. д. и прямого перераспределения направления различных продуктов.

Особенностью асбестообогатительных фабрик является меняющееся во времени задание на качество готовой продукции.

Наиболее важным при управлении качеством для технологов-практиков является правильный выбор параметра, с помощью которого оперативно возможно достичь заданного качества асбеста готовых групп. Основным оценочным показателем качества при этом является содержание тонкодисперсной фракции в готовом асбесте. Далее приводится методика выбора параметра управления по степени инерционности процесса [75].

8.1. Метод выбора параметра управления по степени инерционности процесса

Степень инерционности обогатительного объекта τu – это отношение времени запаздывания конечных результатов изменения данного объекта при воздействии определенного управляющего параметра τk_n к заданному времени получения данных результатов τ_3 :

$$\tau u = \frac{\tau k_n}{\tau_3}, \quad (8.1)$$

где n – управляющий параметр.

При обогащении асбеста происходит задание технологических параметров снизу – изменяется марочность асбеста с изменением его качества – $\beta_{+1,18}$; $\beta_{-0,175}$. Кроме того, задается временной период, за который технологи должны «вывести» данную марку, например за смену. Тогда $\tau_3 = 8$ часов. Фактически на фабрике τ_3 колеблется от 2 до 24 часов.

τk_n – сложный параметр, который возможно получить в результате промышленного эксперимента при одинаковых исходных характеристиках, что на асбестообогащительной фабрике сделать затруднительно. Однако вполне приемлемо за τk_n принимать максимальное время получения конечных результатов при фактическом изменении всех исходных характеристик.

Для схемы обогащения асбеста или любого ее узла исходная характеристика – это:

d – средняя крупность исходного материала, мм;

$\alpha_{асб}$ – содержание асбеста, %;

$\beta_{+1,18}$ – содержание фракции +14 меш (+1,18 мм) в асбесте, %;

$\beta_{-0,075}$ – содержание фракции –200 меш (-0,075 мм) в асбесте, %.

При этом управляющими воздействиями «от» являются:

Q – производительность на один аппарат, т/ч;

S – размер ячейки сита грохота, мм;

V_a – скорость витания асбестового волокна в обогатительном аппарате (грохоте, барабанном классификаторе), м/с.

Пример № 1. Рудный поток

Дано: Необходимо изменить марочность асбеста 3-й группы во II перечистке с $\beta_{+1,18 1}$; $\beta_{-0,075 1}$ на $\beta_{+1,18 2}$; $\beta_{-0,075 2}$; $\tau_3 = 8$ часов.

С помощью изменения производительности Q конечный результат достигается через 2 часа:

$$\tau u_1 = \frac{\tau k_Q}{\tau_3} = 0,25.$$

С помощью изменения размера ячеек сит S конечный результат достигается через 24 часа:

$$\tau u_2 = \frac{\tau k_S}{\tau_3} = \frac{24}{8} = 3.$$

С помощью изменения скорости витания волокна V_a конечный результат достигается через 4 часа:

$$\tau u_3 = \frac{\tau k_{V_a}}{\tau_3} = \frac{4}{8} = 0,5.$$

Таким образом, наиболее оперативно возможно «вывести» заданное качество асбеста 3-й группы, изменяя рудный поток с помощью производительности Q , затем – скорости витания V_a и, в крайнем случае, замены сит S . Отсюда следует, что управление процессом получения заданной группы (марки) асбеста зависит от степени инерционности обогатительного объекта, который выбран для управления.

В общем случае для оптимизации процесса управления должны быть справедливы следующие выражения:

$$\begin{cases} \tau u_{\text{опт}} \rightarrow \min; \\ \tau_3 \neq 0. \end{cases} \quad (8.2)$$

Пример № 2. Перечистка

Дано: Определить степень инерционности обогатительного объекта – схемы II перечистки, $\tau_3 = 8$ часов.

Исходные возмущающие воздействия здесь те же, что и в примере № 1, но количество управляющих воздействий возрастает.

Управляющие воздействия II перечистки:

S – размер ячейки сита грохота, мм;

V_a – скорость витания асбестового волокна в обогатительном аппарате (грохоте, барабанном классификаторе), м/с;

M – момент движения волокна в классифицирующем аппарате, кг·м;

C – объединение потоков волокна с помощью шибера.

С помощью изменения размеров ячеек сит S конечный результат достигается через один час:

$$\tau u_1 = \frac{\tau k_S}{\tau_3} = \frac{1}{8} = 0,125.$$

С помощью изменения скорости витания волокна V_a в аппарате БК-1 конечный результат достигается через 0,5 часа:

$$\tau u_2 = \frac{\tau k_{V_2}}{\tau_3} = \frac{0,5}{8} = 0,0625.$$

С помощью изменения характера (момента) движения волокна в аппарате БК-1 конечный результат достигается через 20 минут, или 0,33 часа:

$$\tau u_3 = \frac{\tau k_M}{\tau_3} = \frac{0,33}{8} = 0,04125.$$

С помощью объединения потоков С конечный результат достигается через 10 минут, или 0,167 часа, тогда

$$\tau u_4 = \frac{\tau k_C}{\tau_3} = \frac{0,167}{8} = 0,02088.$$

Анализ степени инерционности процесса показывает, что очередность управляющих воздействий для данного обогащенного объекта (II перемешки) следующая: $\tau u_4, \tau u_3, \tau u_2, \tau u_1$. Для быстрого получения заданного конечного результата следует сначала регулировать шиберы, затем направление вращения ротора БК-1, затем отсос воздуха из аппарата и лишь в последнюю очередь — размеры ячеек сит.

Если управление производить по двум обогащенным объектам, например по рудному потоку и II перемешке, то сохраняется принцип от наименьшего τu к наибольшему.

Возможно привести и другой пример, когда в качестве τ_3 задается другой период, например, более длительный — 24 ч. При этом показатели τu для одного и того же управляющего воздействия, например размеров ячеек сит S в перемешке, изменятся.

С помощью изменения размеров ячеек сит S конечный результат достигается через один час и степень инерционности процесса «выведения» марки асбеста будет значительно меньше:

$$\tau u_1 = \frac{\tau k_S}{\tau_3} = \frac{1}{24} = 0,042.$$

Иногда требуется укрупненно оценить сам обогащенный объект по его полной степени инерционности. Для этого можно использовать формулу

$$\tau u_{об} = \tau u_1 + \tau u_2 + \dots + \tau u_n. \quad (8.3)$$

В рассмотренных примерах полная степень инерционности объекта будет выглядеть следующим образом:

— для рудного потока

$$\tau u_{об} = 0,25 + 0,5 + 3,0 = 3,75;$$

— для II перемешки

$$\tau u_{об} = 0,02088 + 0,04125 + 0,0625 + 0,125 = 0,24963.$$

Физический смысл полной степени инерционности обогащенного объекта сводится к последовательному изменению всех принятых управляющих воздействий, начиная с воздействия, имеющего минимальную степень инерционности.

Знание полной степени инерционности обогащенных объектов технологической схемы даст возможность на практике принимать решение о том, с управления каким объектом надо начинать. В рассмотренном примере — это II перемешка, так как $\tau u_{II\text{ пер}} \ll \tau u_{руд\text{ пот}}$.

Показатель τk_n точно измерить невозможно. В предыдущих расчетах за этот показатель было принято условно измеренное максимальное время получения конкретного результата при изменении n -го управляющего воздействия.

Если возмущающие воздействия обозначить $U_1; U_2; \dots U_i$, а управляющие — $X_1; X_2; \dots X_n$ %, то

$$\tau k_{n,U} = f(X_1; X_2; \dots X_n; U_1; U_2; \dots U_i); \quad (8.4)$$

$$\tau u = f(X_1; X_2; \dots X_n; U_1; U_2; \dots U_i). \quad (8.5)$$

Для рудного потока

$$\tau u_1 = f(Q; d; \alpha \alpha \beta; \beta_{14}; \beta_{200}); \quad (8.6)$$

$$\tau u_2 = f(S; d; \alpha \alpha \beta; \beta_{14}; \beta_{200}); \quad (8.7)$$

$$\tau u_3 = f(V_s; d; \alpha \alpha \beta; \beta_{14}; \beta_{200}). \quad (8.8)$$

Таким образом, знание степени инерционности обогащенного объекта на практике позволяет оперативно выбирать регулируемый параметр, изменение которого в минимальный срок обеспечивает заданное качество готовой продукции.

8.2. Практика управления качеством готовой продукции на российских предприятиях

Практика «выведения» определенных марок асбеста на асбестообогащенных фабриках основана на использовании гибких схемных решений, заложенных в технологической документации предприятия [76]. В начале 70–80-х годов XX в. технологические карты предприятий жестко определяли получение марок асбеста на закрепленных технологических линиях. В настоящее время технологическая документация составлена более гибко. Схемы перемешки цехов обогащения имеют обычно несколько возможных путей направления как конечных продуктов, так и продуктов перед конечными операциями перемешки. Часто используется введение или исключение последнего классифицирующего аппарата из цепочки.

В первую очередь для получения асбеста необходимого качества используется смешивание (добавление или исключение) подобных продуктов. Это подтверждает тот факт, что данный параметр имеет наименьшую степень инерционности. Для выполнения этой операции на асбестообогачительных фабриках имеется несколько средств: это наличие объединяющих желобов – «тройников» и систем шиберов, объединение продуктов на сборных конвейерах и создание циркулирующей нагрузки.

Во вторую очередь применяется перефазирование ротора аппарата БК, описанное в разделе 5.2. Затем производится замена сит. К регулированию воздухом на практике прибегают на тех предприятиях, где в схемах перемещения используются локальные системы отсоса. Такое «технологическое» регулирование качества готовой продукции осуществляется в том случае, когда необходимо изменить качество в одной или двух технологических линиях.

Если необходимо изменить качество асбеста готовых групп в целом по цеху или секции, то осуществляется регулирование процесса в рудном потоке. Процесс регулирования качества в данном случае обычно происходит за счет изменения производительности. Для этого на многих асбестообогачительных фабриках в голове процесса обогащения (ЦО) установлены питатели с регулируемым управлением загрузкой – весовые дозаторы. Степень инерционности такого мероприятия значительно выше, чем у мероприятий по регулированию качества в перемещенном потоке.

К изменению сит в рудном потоке прибегают крайне редко, так как это самое «инерционное» мероприятие.

Кроме регулирования производительности для улучшения качества готовой продукции в рудном потоке часто используется исключение операции дробления из процесса обогащения за счет так называемых «обводных» желобов.

Пример

Для исключения попадания асбестового волокна в вертикальные молотковые дробилки I стадии обогащения в ОАО «Ураласбест» в 2001 г. была проведена реконструкция IV секции цеха обогащения производства № 1. В 2002 г. институт «НИИпроектасбест» провел сравнительные испытания работы IV и III секций с оценкой количества и качества полученных черновых концентратов при одинаковом качестве и количестве поступающей на секции руды. Результаты испытаний показали, что выход черновых концентратов по схеме с исключе-

нием попадания асбестового волокна в дробилки (обводные желоба) на 0,1–0,5 т/ч меньше, чем по схеме без обводных желобов, что весьма незначительно при общем выходе 8,0–10,0 т/ч. При этом качество черновых концентратов с использованием обводных желобов значительно выше. Так, по содержанию тонкодисперсной фракции данные продукты в среднем лучше на 3,9 %, при этом в некоторых операциях разница доходит до 6,3 %. На рис. 8.1 изображена динамика изменения содержания тонкодисперсной фракции (класса –0,075 мм) по операциям рудного потока по сравниваемым схемам. Рисунок подтверждает сделанные выше выводы. Аналогичные результаты получены и при исследовании асбестового волокна продуктов рудного потока до и после дробления на фабрике № 4 (участок № 2) [57].

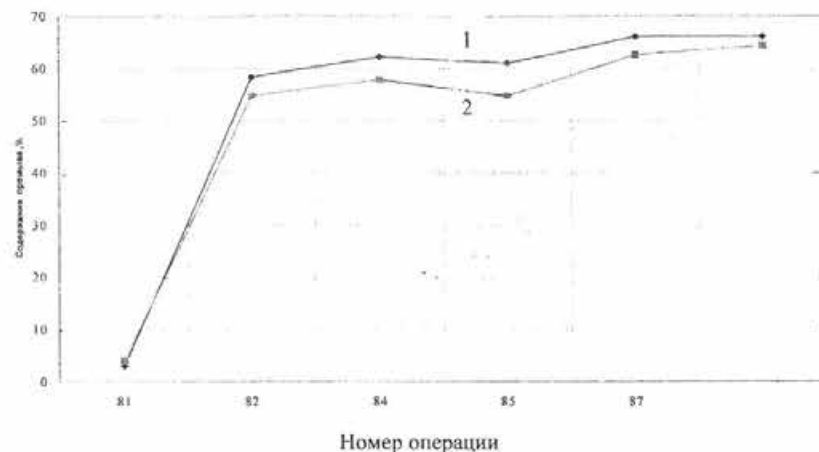


Рис. 8.1. Содержание тонкодисперсной фракции в ч/к III (1) и IV (2) секций ЦО 1

Динамика изменения тонкодисперсной фракции в асбестовом волокне до и после дробления по стадиям рудного потока для I и II секций цеха обогащения участка № 2 показывает, что увеличение содержания тонкодисперсной фракции в асбестовом волокне после дробления происходит в среднем на 9,6 % по I секции и на 4,9 % – по II.

Таким образом, российская практика позволяет получать асбест готовых групп требуемого потребителями качества и оперативно менять марочность продукции, используя различные методы технологического управления процессом: изменение производительности, перераспределение продуктов, изменение режимов работы обогащительных аппаратов и размеров сит на них.

Недостатком российского метода управления качеством готовой продукции является невозможность обеспечения высокого уровня стабильности показателей качества.

За рубежом для достижения требуемого качества асбеста применяют сложные схемы смешивания узких классов асбеста.

8.3. Управление качеством готовой продукции путем смешивания узких классов – зарубежная практика

В зарубежной практике для управления качеством готовой продукции в большей степени, чем в России, используются процессы **усреднения и дозирования** различных продуктов обогащения, в том числе и конечных продуктов.

На предприятиях «Баланжеро» (Италия), которые в настоящее время не эксплуатируются из-за запрета на асбест, процесс управления качеством готовой продукции осуществлялся начиная с черновых концентратов [77]. На рис. 8.2 изображена схема управления качеством готовой продукции на данном предприятии. Схема предполагает складирование черновых концентратов в бункеры емкостью 40 т, разгрузка которых осуществляется шнеками. Технологический процесс пересыпного потока основан на получении четырех узких классов крупности: + 4 мм; - 4 мм + 2,5 мм; - 2,5 мм + 1,2 мм; - 1,2 мм. В каждый из классов крупности объединяются продукты из различных технологических линий. Каждый узкий класс складировается в бункеры – силосы, имеющие емкость до 100 м³. Загрузка силосов производится в нескольких точках с конвейеров или со шнеков по всей ширине бункеров. Разгрузка асбестового волокна из силосов осуществляется шнековыми конвейерами. Разгрузочные шнеки работают с переменным шагом и вращаются в разных направлениях. Из силосов цеха обогащения узкие классы крупности асбеста раздельно подаются в упаковочное отделение с помощью шнеков.

Управление качеством готовой продукции осуществляется путем автоматического включения в работу в пересыпных линиях дополнительных обогатительных аппаратов и изменения дозируемого количества короткого волокна с помощью автоматического управления скоростью вращения шнека. Использование такой системы управления качеством готовой продукции в Италии позволяло обеспечить колебания качественных показателей готовой продукции не более чем на 5–10 %.

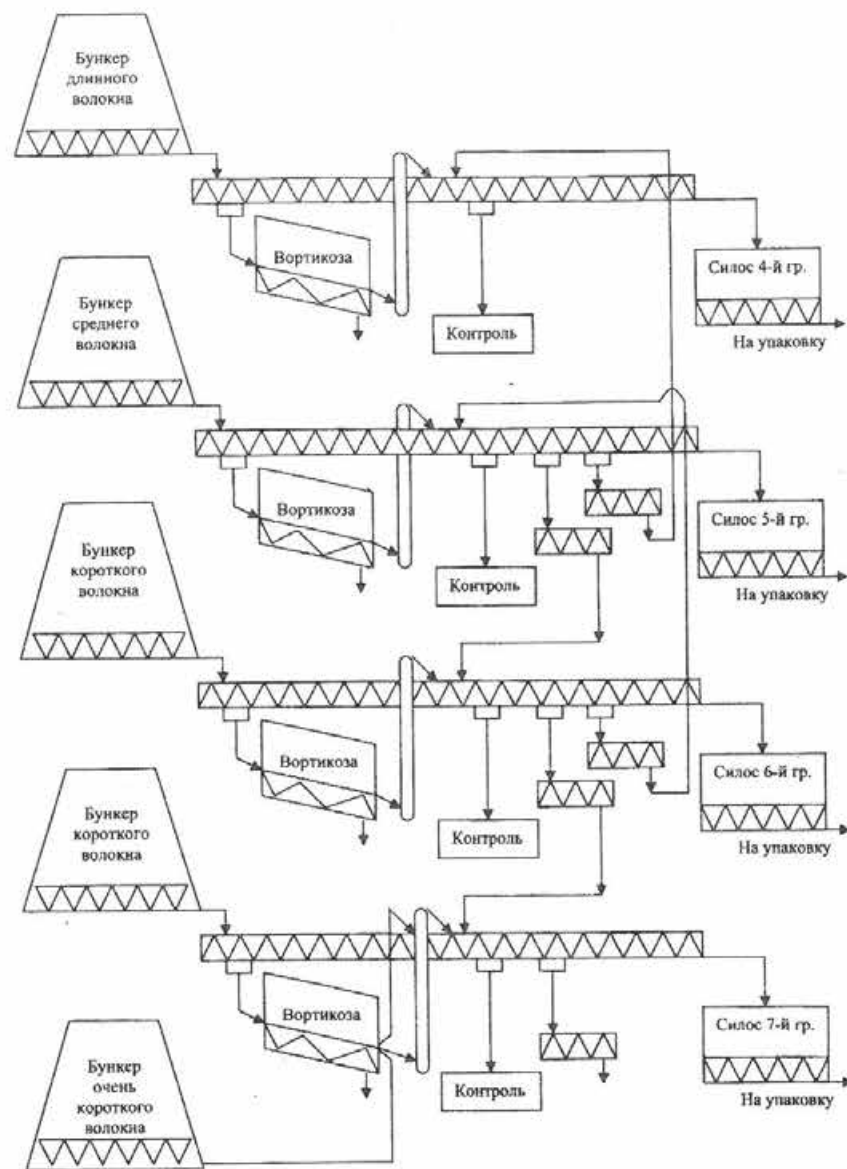


Рис. 8.2. Технология управления качеством асбеста на фирме «Баланжеро», Италия

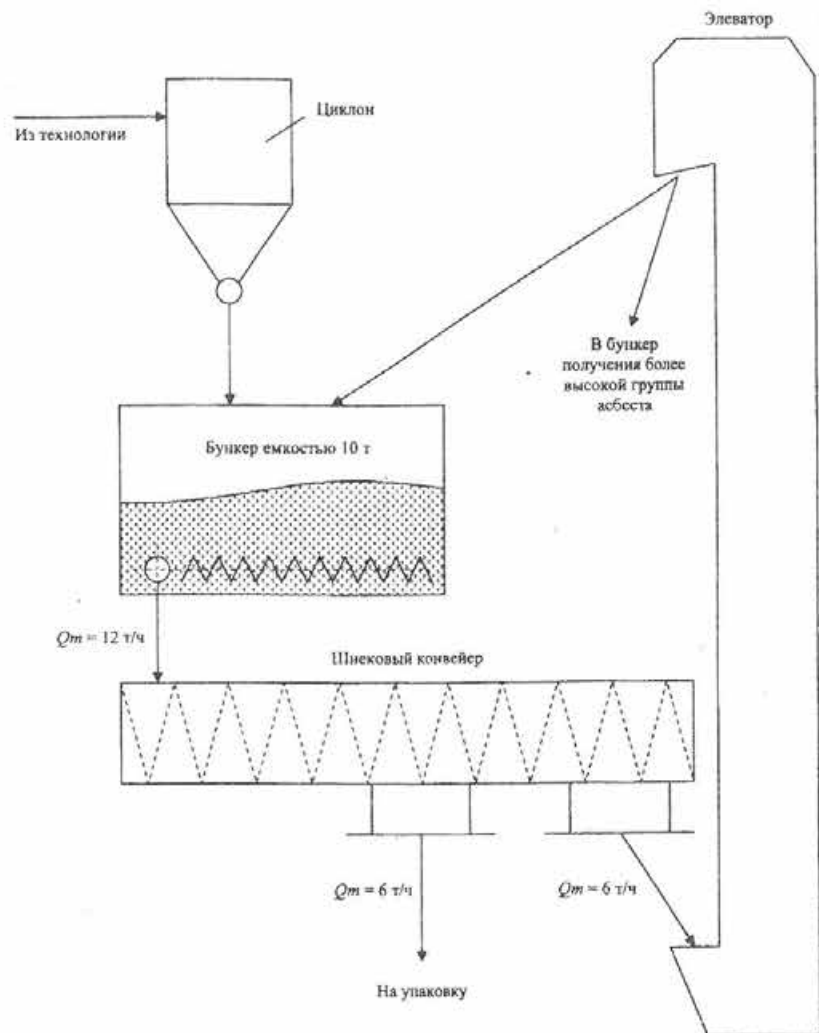


Рис. 8.3. Технология стабилизации качества асбеста на фабрике «LAB», Канада

На предприятии «LAB» в Канаде перед упаковочным отделением существует специальный участок стабилизации качества готовой продукции, где осуществляется непосредственно процесс управления качеством. В состав специализированного участка входят бункеры емкостью до 10 т со шнековой разгрузкой, транспортный шнек, направляющий половину

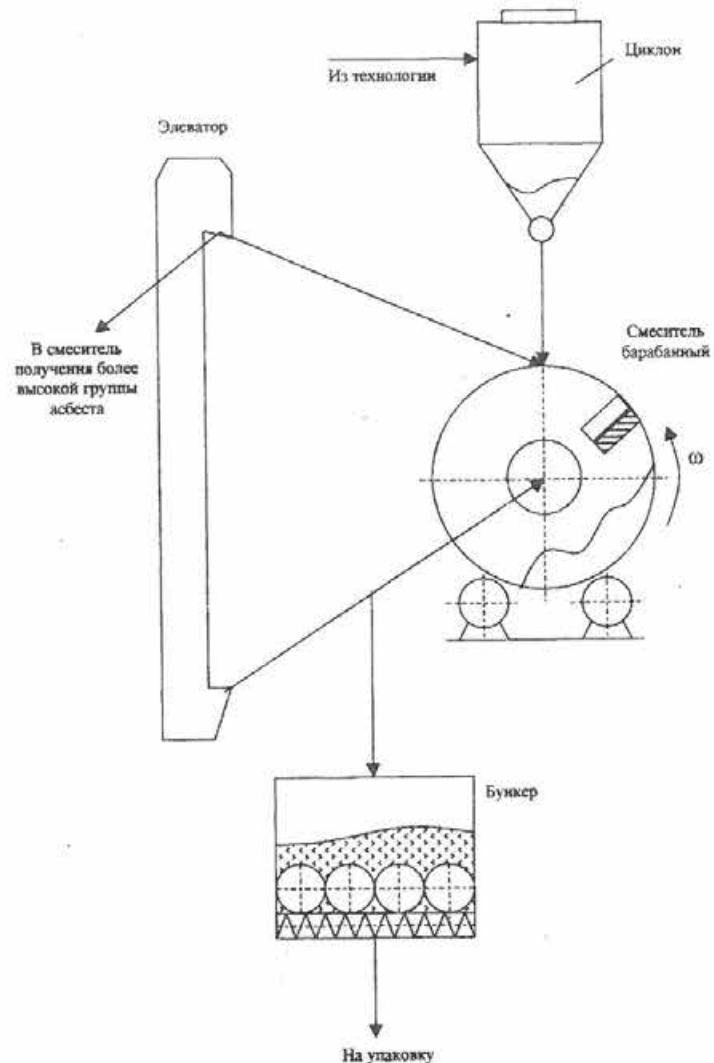


Рис. 8.4. Технология стабилизации качества асбеста на фабрике «Нормандия», Канада

продукта на упаковку, элеватор, возвращающий вторую половину продукта из транспортного шнека в бункер (рис. 8.3). Количество продукта в бункере поддерживается не ниже заданного уровня. С элеватора продукт может направляться в несколько бункеров. В бункерах находятся так же, как и в предыдущем случае, узкие классы крупности асбеста.

Управление качеством готовой продукции осуществляется автоматическим дозированием добавки более мелкого класса в более крупный, которое производится после оперативного анализа отобранных проб.

Кроме бункеров в Канаде [78] для управления качеством готовой продукции широко используются миксеры-смесители. На рис. 8.4 изображена схема управления качеством готовой продукции на фабрике «Нормандия» (не эксплуатируется). Черновые концентраты, извлеченные с грохотов рудного потока, объединяются в два потока по качеству асбестового волокна и складываются отдельно в двух бункерах. Разгрузка бункеров осуществляется трехшнековыми питателями, которыми концентраты с постоянным объемом подаются на технологические линии упаковки.

Управление качеством готовой продукции обеспечивается развитым узлом смешивания дозированных потоков асбеста на выходе из технологического процесса. В состав данного узла входят барабанный смеситель-миксер, плоский скребковый элеватор и бункер-накопитель готового асбеста. Скребковый элеватор работает в замкнутом цикле с миксером данной линии и одновременно связан с миксером соседней технологической линии. В миксер возможно направлять продукты из нескольких точек. Циркуляционная нагрузка составляет 100 %.

Фирма «Джонс Менвилл» [79] имеет полный автоматизированный комплекс управления качеством готовой продукции. Комплекс включает в себя автоматизированные системы управления загрузкой и разгрузкой бункеров сухой руды, процессом сушки асбестовой руды, процессом дозирования черновых асбестовых концентратов и процессом усреднения и смешивания узких классов с получением асбеста 127 марок заданного качества. Схемы смешивания подобны схемам компании «Нормандия».

Зарубежные методы управления качеством асбеста в большинстве случаев невозможно применить без стабилизации исходной руды по качеству и количеству. Их особенностями также являются автоматизированный отбор и анализ проб на качество и широкое использование средств и систем автоматизации при приготовлении асбеста заданного качества.

8.4. Резюме

1. К технологическим принципам управления относятся такие систематизированные приемы регулирования качества готовой продукции, ко-

торые позволяют с помощью технологических средств достигать заданного качества готовой продукции в заданное время.

2. Одним из показателей для управления качеством асбеста является степень инерционности процессов обогащения – обогатительных объектов. Степень инерционности обогатительного объекта – это отношение времени запаздывания конечных результатов изменения данного объекта при воздействии определенного управляющего параметра τ_k , к заданному времени получения данных результатов τ .

3. Российская практика позволяет получать асбест готовых групп требуемого потребителями качества и оперативно менять марочность продукции, используя различные методы технологического управления процессом: изменение производительности, перераспределение продуктов, изменение режимов работы обогатительных аппаратов и размеров сит на них.

4. Управление качеством готовой продукции за рубежом осуществляется путем автоматического включения в работу в пересчетных линиях дополнительных обогатительных аппаратов и изменения дозируемого количества различных видов асбестового волокна с помощью автоматического управления процессами дозирования и смешивания асбеста узких классов крупности.

9. ПОТРЕБИТЕЛИ АСБЕСТА

Сфера потребления хризотил-асбеста обусловлена его уникальными свойствами: низкой проводимостью тепла, электрического тока и звука; способностью к прядению; щелочестойкостью и антикоррозийной способностью, высокой прочностью на разрыв; гибкостью и пластичностью волокна; высоким коэффициентом трения и адсорбционной способностью; способностью к образованию устойчивых композиций с различными вяжущими материалами – цементом, битумом, смолами и др.

В настоящее время нет ни одной отрасли промышленности и строительной индустрии, в которой не использовался бы хризотил-асбест. Однако следует особо отметить отрасли, требования которых имеют приоритетное значение в развитии асбестовой промышленности. Это – асбестоцементная, автомобильная, химическая, электротехническая промышленность, энергетика, машиностроение и металлургия.

Развитие асбестового производства всегда было связано с оборонной промышленностью и новыми отраслями техники. Для освоения космоса, создания ракетного оборонного щита требовались и требуются материалы, способные выдерживать высокие температуры, скорости и давление. В решении данных задач природному минералу хризотил-асбесту нет альтернативы до настоящего времени [80].

9.1. Производство асбестоцемента

В настоящее время асбестоцементные изделия широко используются в строительстве в виде панелей, блоков, шифера, мягких кровельных материалов, труб для водопроводов, теплосетей и канализации.

В мире проложено более 2,5 млн км асбестоцементных труб (рис. 9.1). Они не насыщают воду канцерогенами, не вступают в реакцию с другими веществами, не поддаются коррозии, имеют низкую теплопроводность, пригодны для любых климатических зон, экономичны, долговечны и просты в монтаже. Асбестоцементные трубы в общем мировом балансе потребления всех видов труб (металлических и неметаллических) составляют 12 %. В структуре потребления их доля составляет, %:

- для орошения и водоснабжения – 57;
- в сетях канализации – 12;
- в линиях связи – 16;
- на прочие нужды (дренаж, ограждения) – 15.

В современном строительстве широкое применение получил шифер. Его отличают высокие прочностные свойства, которые со временем только усиливаются, возможность ускоренного монтажа, дешевизна. Современные технологии обеспечивают шиферу эстетическую привлекательность (рис. 9.2). Асбестоцементные заводы России производят окрашенный и неокрашенный шифер. Заводы используют как зарубежные способы окрашивания и краски, так и отечественные. В настоящее время широкое распространение в обустройстве кровли и фасадов зданий получили мелкоформатные асбестоцементные плитки, подобные черепице. Уложенные по способу «сот» или «чешуи», они выглядят эстетично и обеспечивают водонепроницаемость, прочность и звукопоглощение стен и кровли здания.

В своей основе асбестоцементное производство является химическим, поскольку твердение изделий осуществляется в результате химического взаимодействия цемента с водой, в смеси с асбестом.

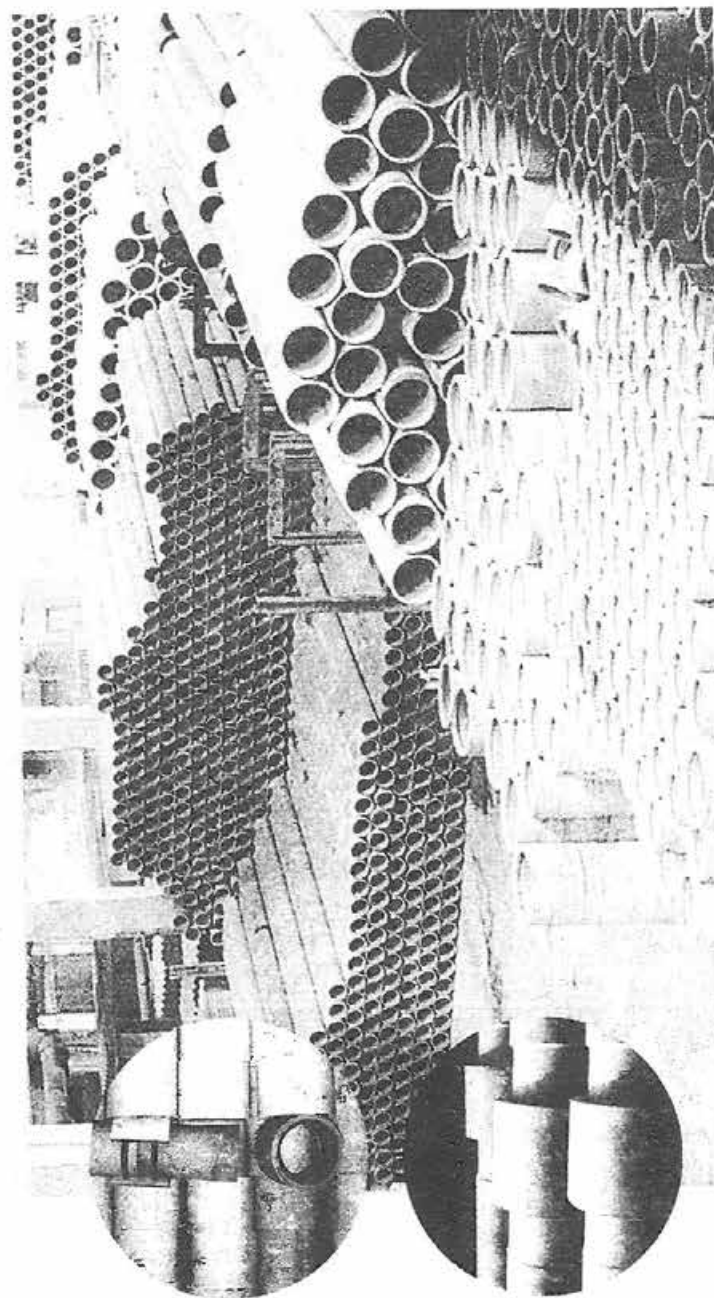


Рис. 9.1. Асбестоцементные трубы

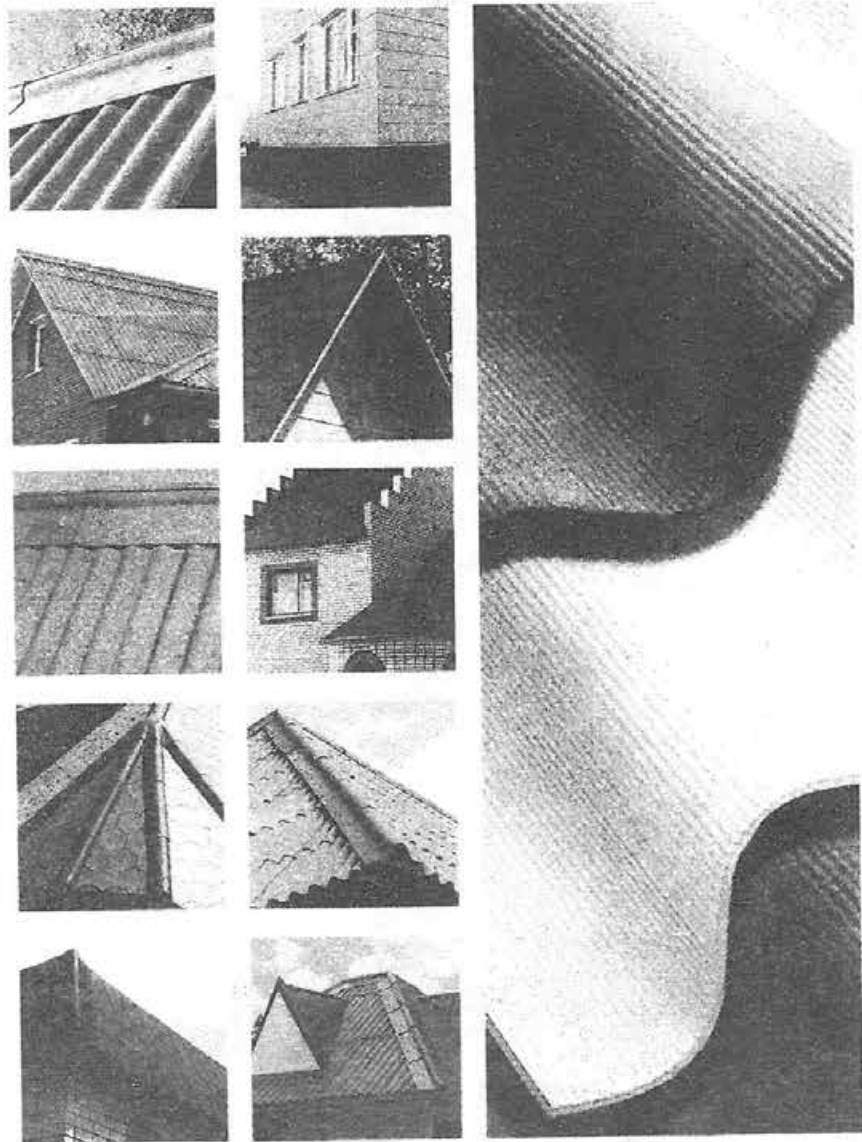


Рис. 9.2. Шифер и кровля

Как любое современное химическое производство, оно включает целый ряд «нехимических» технологических процессов, таких, как распушка асбеста, приготовление асбестоцементных смесей и их формование [29].

Производство асбестоцемента принципиально одинаково для асбестоцементных листов и труб. Отличие заключается в использовании более длиноволокнистых марок асбеста при производстве труб и различных методах формования сырого наката после фильтрования и вакуумирования. Режимы работы оборудования также имеют некоторые отличия.

Основными компонентами при производстве асбестоцемента являются асбест, цемент и вода. Подробное описание свойств асбеста приведено выше.

Основным видом цемента, применяемым при традиционной технологии производства асбестоцементных изделий, является портландцемент. Портландцементный клинкер представляет собой многоминеральный и поликристаллический продукт. Клинкер состоит из кристаллов силикатов кальция – алита (C_3S) и белита (C_2S), а также промежуточной фазы, заполняющей объем между ними. Промежуточная фаза состоит из C_3A – трехкальциевого алюмината, C_4AF – алюмоферрита и стекла [81].

В производстве асбестоцемента используют чистую речную или артезианскую воду. В последнее время большинство предприятий работает на оборотной технической воде, которая контролируется по pH, щелочности, содержанию масел и смолообразующих продуктов и токсичных веществ.

Производство асбестоцемента по традиционной технологии складывается из следующих основных процессов:

- распушки асбестового волокна;
- приготовления асбестоцементных суспензий;
- фильтрации суспензий;
- обезвоживания и уплотнения отфильтрованных слоев (паст);
- профилирования свежесформованного полуфабриката (трубы или листа);
- твердения полуфабриката.

Распушка асбеста – важный процесс, обеспечивающий создание необходимой структуры асбестоцементных суспензий и паст.

Распушка асбеста подразделяется на предварительную и окончательную.

Предварительная распушка асбеста осуществляется в бегунах, где материал измельчается путем раздавливания и некоторого истирания. При таких режимах работы бегунов происходит разрушение агрегатов волокон вдоль плоскости спайности на отдельные более тонкие волокна с минимальным их укорочением. При этом асбест увлажняется. Длительность обработки асбеста в бегунах тщательно подбирается опытным путем, так как превышение оптимального времени распушки увлажненного асбеста приводит к значительному укорочению асбеста.

Окончательная распушка асбеста происходит под воздействием турбулентного, пульсирующего потока жидкости, а также при столкновении с твердыми препятствиями. Инерционность пучков асбеста в переменном поле скоростей жидкости приводит к тому, что при обтекании их вихревым потоком на поверхности развиваются значительные гидродинамические усилия, способные оторвать отдельные волокна от пучка, то есть распушить асбест. Процесс окончательной распушки на асбестоцементных предприятиях происходит в голлендорах, гидропушителях или конусных гидросмесителях.

Для получения однородных асбестоцементных суспензий большое значение имеют адгезия (взаимодействие волокон асбеста с частицами цемента) и аутогезия (взаимодействие волокон асбеста или частиц цемента друг с другом). Процессы распушки асбеста и перемешивание асбеста с цементом взаимосвязаны. Чтобы получить однородную асбестоцементную суспензию, используют последовательные операции смешивания распушенного асбеста с цементом в дозируемых объемах и перемешивания готовой асбестоцементной суспензии в ковшевой мешалке. Качество смешивания компонентов суспензии оценивается по степени его гомогенности.

Под гомогенностью смесей понимается такое распределение компонентов, при котором их содержание в любом микрообъеме перемешиваемой системы близко к заданному соотношению.

Чтобы достичь оптимальной гомогенности смеси компонентов в промышленности, часто в дополнение к существующему оборудованию используют специальный гомогенизатор.

Традиционная технология формования асбестоцементных изделий осуществляется на круглосетчатых листоформовочных (например, ЛФМ-СМ-943) или трубоформовочных машинах из разбавленных суспензий (рис. 9.3). Используемые в настоящее время конструкции машин для формования изделий обеспечивают ориентацию волокон в плоскости элементарных слоев и общую направленность волокон. Тщательная предвари-

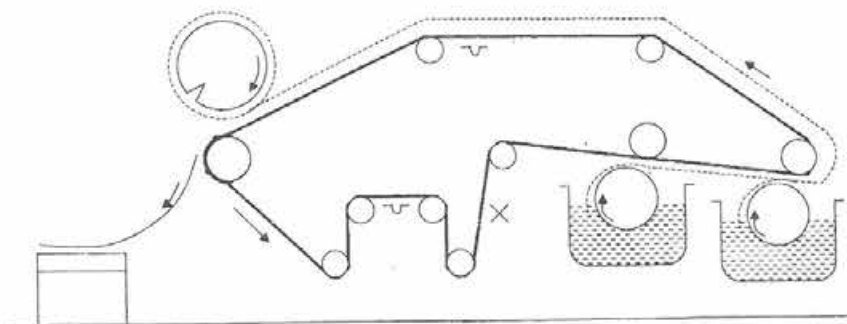


Рис. 9.3. Эскиз листоформовочной машины

тельная подготовка суспензии: распушка асбеста и обеспечение высокой гомогенности смеси – позволяют достаточно эффективно использовать армирующие свойства асбеста за счет его диспергации в воде и обеспечивать быстрое осаждение вяжущего на асбесте. Технология осуществляется на поточно-механизированных линиях типа СМ-1155. Недостатком традиционной технологии является использование большого количества воды (около 180 м³/ч) – содержание сухих веществ в асбестоцементной суспензии 4–15 %.

Существуют другие методы формования асбестоцементной суспензии. При содержании сухих веществ в асбестоцементной суспензии 35–45 % производятся крупноразмерные листы периодического профиля, безнапорные трубы на линиях типа «Марьяни» и фасонные изделия на машинах типа «Испра». На агрегатах типа «Марьяни» обезвоживание осуществляется путем вакуумирования с прокаткой, на агрегатах «Испра» используют ипжекцию или вакуум-фильтрацию с последующим упругим прессованием.

При содержании сухих веществ в асбестоцементной суспензии 75–80 % производится формование асбестоцементной суспензии методом экструзии. Также существует метод формования асбестоцементных суспензий прокатом сухих или полусухих смесей при содержании сухих веществ в асбестоцементной суспензии 85–90 %.

С помощью **вакуум-обезвоживания** в основном удаляется влага физико-механической связи. Данная влага находится в макрокапиллярах.

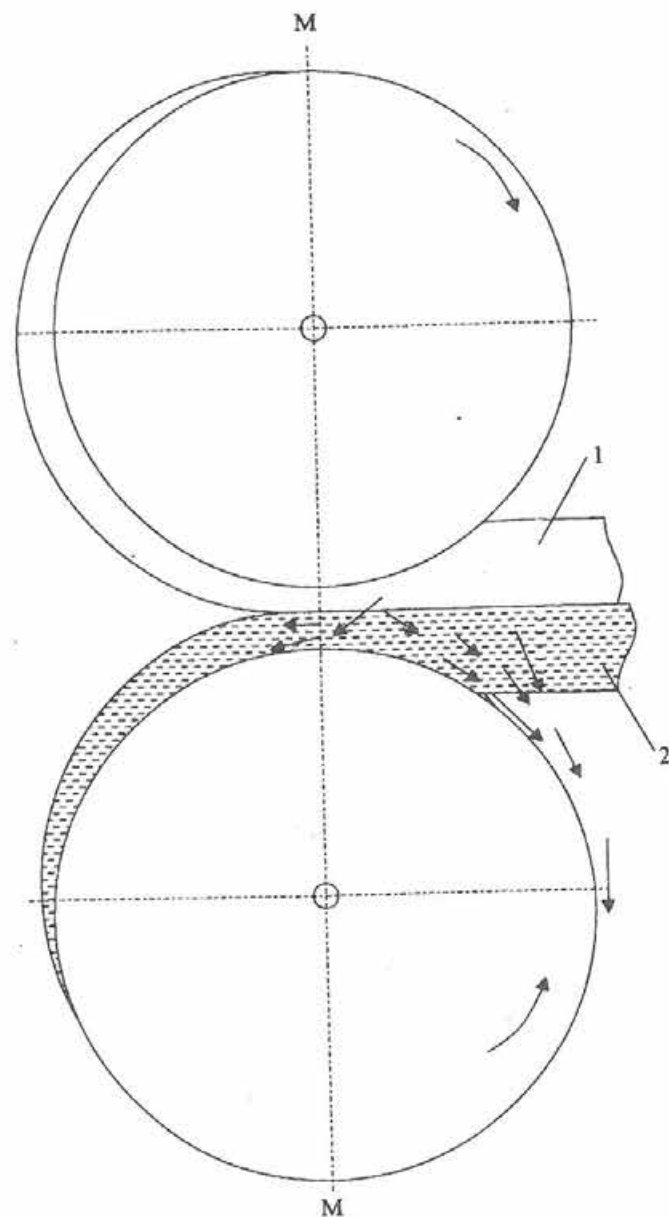


Рис. 9.4. Уплотнение прокаткой асбестоцементного слоя на сукне:
1 – асбестоцементный слой; 2 – техническое сукно

Кроме вакуум-обезвоживания для удаления излишней влаги из сырых изделий используется процесс **уплотнения отфильтрованных и вакуумированных асбестоцементных слоев прокаткой на техническом сукне**. Данный процесс является одним из основных в производстве асбестоцемента (рис. 9.4). Эффективность уплотнения слоя в значительной степени зависит от давления в прессовой части формовочной машины, характера его изменения, деформативных свойств слоя, скорости движения и качества технического сукна. Деформативные свойства слоя во многом зависят от качества и природных свойств применяемого асбеста и качества цемента. Основным показателем качества асбеста при этом является показатель содержания тонкодисперсной фракции в нем. Высокое содержание последней приводит к невозможности ее агрегирования с цементом, вымыванию из асбестоцементного слоя при уплотнении и вакуумировании, что ухудшает деформативные свойства слоя, а в дальнейшем прочность асбестоцементного изделия.

Профилирование асбестоцементных листов производится с целью увеличения их несущей способности. Асбестоцементные листы, используемые в строительстве, подвергаются в основном изгибающим нагрузкам. В процессе профилирования (волнировки) свежесформованный полуфабрикат подвергается изгибу, при котором наружные слои (выше нейтральной оси) растягиваются, а внутренние (ниже нейтральной оси) сжимаются. Для профилирования асбестоцементных листов применяются механические волнировщики и вакуум-волнировщики с использованием и без использования прокладок.

Независимо от способа волнирования и механизма, при помощи которого осуществляется процесс, после прекращения действия рабочих органов сволнированный лист некоторое время должен лежать на профильном основании. При этом внутренние напряжения, вызванные упругой деформацией при изгибе полуфабриката в процессе волнирования, способны вызвать искажение профиля. Такое искажение во многом зависит от механических свойств полуфабриката, то есть состава смеси асбеста (см. раздел 3.3), степени ее распушки и количества асбеста в асбестоцементной смеси, свойств цемента и объемной массы полуфабриката. Таким образом, максимальное сохранение требуемой конфигурации профиля может быть достигнуто при использовании волнировочных аппаратов, учитывающих упругую деформацию полуфабриката. Таким аппаратом является вакуум-волнировщик. Это особенно важно, когда между листами при волнировании и предварительном твердении нет прокладок. В России для изготовле-

ния асбестоцементных волнистых листов в основном используется беспрокладочный метод, за рубежом – прокладочный.

Кроме волнистых листов в строительстве широко используются плоские асбестоцементные листы. Они изготавливаются на поточно-механизированных линиях, оборудованных прессами различной мощности.

Твердение свежеформованных асбестоцементных изделий является также основным процессом. В результате твердения пластичный полуфабрикат превращается в камневидный, дисперсно-армированный материал, обладающий необходимой прочностью, водонепроницаемостью и др. свойствами. Процесс твердения в десятки и сотни раз продолжительнее всех предшествующих процессов, и именно он определяет общую длительность производственного цикла. Данный процесс протекает в несколько этапов.

Первым этапом для производства волнистых листов беспрокладочным методом является предварительное твердение свежеформованного полуфабриката на **конвейере твердения** продолжительностью 3,5–4 часа, в течение которых листы должны приобрести съемочную прочность, которая составляет 40–45 % от прочности готовых изделий.

Второй этап – **окончательное твердение**, протекает на теплых складах до достижения изделиями стандартных физико-механических показателей и составляет 5–10 суток.

В производстве асбестоцементных труб часто между первым и вторым этапами добавляется твердение труб в водных бассейнах. Выдержка труб на конвейере твердения составляет 6–8 часов, в бассейне – 7–10 суток, окончательное твердение в теплом складе – 14 суток.

Твердение асбестоцементных изделий происходит в результате их гидратации, под которой понимается гидратация цементной составляющей. **Гидратация цемента – это взаимодействие воды с зернами цемента. Данный процесс – это гетерогенный процесс, происходящий на поверхности раздела фаз цемент – вода.**

Ускорение процесса твердения асбестоцемента производится с помощью паровоздушного прогрева после приобретения изделием минимальной прочности. Например, для асбестоцементных труб режимы паровоздушного прогрева следующие:

- температура в конвейере твердения – 30–35° (3–5 ч);
- температура воды из разбрызгивающих форсунок – 50–55° (время выдержки – 15–25 ч).

Одним из необходимых процессов в технологии производства асбестоцемента является процесс **рекуперации технологической воды**. Для этих целей на предприятиях существуют рекуператоры чистой и грязной воды. Схема подачи и разборки воды из рекуператоров, их емкость, периодичность очистки в значительной мере влияют на общий технологический процесс производства асбестоцемента, а количество сырых отходов, получаемых при этом («асбестит»), характеризует эффективность ведения технологического процесса в целом. Существуют примеры полного оборота сырых отходов в технологии, однако данная добавка должна быть строго дозированной.

Контроль за качеством асбестоцементных изделий осуществляется по показателям штамповой или планочной нагрузки, предела прочности на изгиб, ударной вязкости и плотности сырого и сухого образцов. В процессе производства асбестоцементных изделий определяется влажность пленки до и после фильтрации, степень распушки после бегунов и гидропушителя, содержание твердого в смывах ЛФМ, температура технологической воды.

Таким образом, технология производства асбестоцементных изделий является достаточно сложной и во многом зависит от качества используемых материалов, и в особенности асбеста.

9.2. Производство асбестовых тканей

Производство ткани из асбеста было известно с незапамятных времен. Существует легенда, что Никита Демидов подарил Петру I очень красивую скатерть. Однажды царь вызвал заводчика и приказал накрыть стол этой скатертью. Демидов якобы нечаянно облил скатерть вином. Государь очень огорчился неловкости гостя. Тогда Никита сорвал со стола скатерть и бросил ее в огонь. Гости были уверены, что скатерть сгорит. Однако Демидов вытащил скатерть из огня, охладил и снова расстелил на столе. Скатерть сияла как новая, так как была изготовлена из негорючего уральского хризотил-асбеста.

Производство асботканей в настоящее время осуществляется на предприятиях асбестотехнической промышленности, которая потребляет 12 % производимого асбеста.

При изготовлении асботканей используются придильная, композиционная и адсорбционная способности асбеста, а также способность отражать радиационное излучение. Из асбеста, хлопка, лавсана и других волокон производится пряжа, служащая основой для многих материалов:

асбестового полотна, набивок и шнуров. Асбестовые ткани и асбестотканевые набивки в комбинации с резиной служат теплоизоляционным материалом для паровых котлов, труб, холодильников, компрессоров и калориферов. Из асбестового полотна, армированного латунной или медной проволокой, делают прокладки, применяемые в моторостроении, тормозные ленты, колодки, антифрикционные детали и материалы, которые обладают прочностью, незначительной изнашиваемостью, огнеупорностью и бесшумностью действия.

В настоящее время производят достаточно небольшой ассортимент асбестовых тканей, пряжи и шнуров. Это асботкани марок АТ-12, АТ-9, АТ-10, АТ-14 и АЛТ-1 и 2. Ранее асбестотехническая промышленность производила более 18 наименований асботканей для дальнейшего изготовления асботекстолита, прорезиненных тканей, теплоизоляционных и прокладочных материалов, теплоизоляционных оберточных матрацев, фрикционных тканых изделий (см. раздел 9.3), диафрагм при электролизе воды, асбопластиков и защитной одежды. В качестве сырья для производства асботканей используется асбест текстильной группы (0, 1, 2) и связующее – натуральное или синтетическое волокно. Натуральное волокно, используемое при производстве асботканей, – это хлопок, в качестве синтетических волокон применяется в основном лавсан [82]. Для специальных видов тканей иногда применяется нить из стекловолна. Например, в состав смеси для изготовления ткани АТ-9 входят, %:

– хлопок средневолокнистый 31/32 мм, 1-й сорт	14,5
– асбест марки А-2-30	12,0
– концы ровницы и выпады чесальных аппаратов	73,5

Для изготовления асбестовых тканей в смеси используется часто 80–95 % асбеста, поэтому его качество оказывает огромное влияние как на качество получаемых асботканей, так и на технологичность всего производственного процесса. Основным показателем текстильного асбеста является его длина, однородность по длине (малое содержание классов – 5 мм и – 0,5 мм), отсутствие посторонних примесей (гали, магнетита, мусора), равномерная и оптимальная степень распушки волокна. Особенным показателем для асбестовых тканей является показатель потерь при прокаливании. Данный показатель характеризует теплостойкость асбестовой ткани и не может управляться ни в процессе обогащения асбестовой руды, ни при изготовлении асбестовых тканей. Этот показатель характеризует природные свойства хризотил-асбеста того или иного месторождения или залежи. В среднем он должен составлять около 14 %.

Технологический процесс изготовления асбестовых тканей:

- предварительная обработка сырья;
- смешивание компонентов;
- чесание смеси с приготовлением ровницы;
- прядение пряжи;
- кручение нити;
- изготовление ткани.

Асбест подвергается предварительной распушке в бегунах или дувильно-смешивающих машинах (например, РТ-2-АС) и очистке от пыли и сорных примесей в трепальных машинах периодического действия (например, ТМ-2Ма). Хлопок также очищается в разрыхлительно-трепальных машинах или вертикальных разрыхлителях ударного действия. Химические волокна очистки не требуют, и поэтому их разрыхляют в разрыхлительных машинах. Обраты (выпады из-под чесальных аппаратов, концы ровницы и т. д.) также очищаются и разрыхляются при необходимости.

Важным при производстве асботканей является процесс **смешивания компонентов**. Исходные волокна очень неоднородны, в особенности по степени распушки. Для устранения данного различия существует различное смешивающее оборудование. Классическим типом такого оборудования является смешивающая машина камерного типа периодического действия, создающая компонентный, а затем смесовой настиль.

В настоящее время на современных заводах приготовление и смешивание компонентов осуществляются на механизированных поточных линиях. После раздельной очистки и разрыхления асбест (раздельно по сортам), хлопок (лавсан) и обраты воздухом подаются в специальные лабазы. Для дозировки компонентов смеси в соответствии с рецептами лабазы-дозаторы установлены на специальных платформенных или тензовесах. Приготовленные таким образом и накопленные в нужном количестве компоненты смеси поступают по ленточному транспортеру в пневмолинию, которая направляет их в смешивающие машины, например смешивающую машину с игольчатой решеткой. На пути в смешивающие машины компоненты смеси в вентиляторе подвергаются эмульсированию жировой эмульсией, состоящей из минеральных жиров и эмульгаторов. В смешивающих машинах большой объем всех компонентов тщательно перемешивается. Далее смесь поступает по пневмотранспортной линии в механизированные лабазы-питатели, установленные над бункерами самовесов чесальных аппаратов.

Чтобы получить ровную и добротную пряжу, необходима дальнейшая подготовка волокнистого материала. Она выполняется на чесальной машине.

Сущность процесса чесания заключается в том, что введенная в чесальную машину волокнистая масса подвергается воздействию игольчатых поверхностей рабочих органов. Главный барабан, захватив волокно, проносит его под медленно вращающимися рабочими органами, которые иглами своей гарнитуры прочесывают волокно. Часть волокна остается на иглах, часть (большая) – на барабане.

Множественность чесания и сложения обеспечивает интенсивное разрыхление волокна и его перемешивание.

В процессе чесания из волокна выделяются сорные примеси. Для асбеста – это галля, иголки, магнетит и немалит.

Окончательной целью процесса чесания является разделение прочесанного волокна на узкие, ровные ленточки – ровницу. Нити ровницы в виде отдельных кружков наматываются на скалку.

Конструкции механизмов чесального аппарата, на котором перерабатывают асбестовые смеси, отличаются от конструкций аппаратов, перерабатывающих другие волокна из-за большего удельного веса асбестового волокна, худших его упругих свойств и неравномерности асбестовых волокон по длине по сравнению с другими волокнами. Эти отличия в основном заключаются в ослаблении скоростных режимов чесания.

Сущность прядения заключается в том, что ровница на прядильной машине подвергается вытягиванию, а затем скручиванию. В результате этого процесса из ровницы получается пряжа, которая для удобства транспортировки и дальнейшего ее использования наматывается на шпули или катушки. В результате скручивания пряжа приобретает необходимую прочность.

Для асбестовой пряжи этот процесс имеет некоторые особенности. Неоднородный состав самого асбеста по длине передается и ровнице, поэтому асбестовая ровница прядется в основном без вытяжки. Ровница на прядильной машине подвергается только крутке и наматыванию на катушку. Существует прядильная машина П-176-АЗ* с вытяжным прибором.

Одиночная пряжа имеет главный недостаток – неоднородность. Одиночная пряжа, скрученная в две, три или более нитей, приобретает прочность и ровность. Существуют два способа **кручения** одиночной пряжи – однокруточный и двухкруточный. Большинство тканей из асбестовой пряжи состоят из двухниточной основы и двух-, трех- или четырех-

ниточного утка. Крученая пряжа предназначена для изготовления набивок, шнуров, прокладок и др. Она скручивается в две или более нитей. Для придания пряже особой прочности, а также в зависимости от назначения в пряжу добавляют (зарабатывают) тонкую латунную проволоку, а иногда крученую хлопчатобумажную, шелковую, льняную нить или нить из искусственного волокна или стекловолокна. Для кручения асбестовой пряжи используют в основном кольцевые крутильные машины.

Конечным продуктом асбестового текстильного производства являются набивки, шнуры, ленты, нити и ткани. В зависимости от назначения, ткани вырабатывают различной толщины, ширины, а также различных переплетений, которые осуществляются двумя плетениями нитей – **основой и утком**. Нити основы и утка в структуре ткани располагаются перпендикулярно друг другу. Перед **процессом ткачества** пряжа должна быть подготовлена: перемотана с крутильных катушек в уточные початки или на ткацкий навой (для основы). Изготовление асботканей производится на различных ткацких станках, например типа ТТ-160.

Асбестовую пряжу контролируют по толщине, крутке, прочности, удлинению и внешним порокам. Асбестовую ткань испытывают по весу 1 м², по толщине, плотности по основе и утку, разрывной нагрузке.

9.3. Производство асбофрикционных изделий

Технология производства асбофрикционных изделий весьма разнообразна. В одних случаях она сходна с технологией производства пластмасс или резинотехнических изделий, в других – является родственной текстильному производству и изготовлению бумаги и картона.

Все фрикционные изделия подразделяются на две основные подгруппы:

- изделия, работающие в механизмах (тормозах), которые предназначены для создания за счет трения искусственного сопротивления движению. К ним относятся тормозные накладки, тормозные колодки, тормозная лента;

- изделия, работающие в механизмах (муфтах сцепления), которые предназначены для передачи движения от одной части машины к другой за счет трения. К ним относятся накладки сцепления (кольца) и сектора.

Эффективность работы таких изделий определяется значениями коэффициента трения, его стабильностью в различных режимах работы материала и износостойкостью [83].

Принято относить к фрикционным такие материалы, коэффициент трения которых превышает 0,2 в условиях сухого трения.

В настоящее время распространены следующие типы фрикционных устройств: колодочные, камерные, ленточные, дисковые и коньковые. В современной технике применяются различные типы фрикционных материалов: органические (пробка, кожа, дерево); металлические (чугуны и стали некоторых марок); металлокерамические на железной и медной основе, получаемые методами порошковой металлургии; асбополимерные.

Наибольшее распространение получили фрикционные асбополимерные материалы (ФАПМ). Они содержат до 15 компонентов, которые можно разделить на три основные группы:

- теплоустойчивый армирующий компонент - волокнистый асбест (15-60 %);
- мелкодисперсные фрикционные наполнители, как правило, неорганического происхождения (20-60 %);
- полимерное связующее - синтетические и натуральные каучуки, синтетические смолы с вулканизирующими агентами (отвердителями), ускорителями и активаторами вулканизации.

Волокно хризотил-асбеста вводят в состав ФАПМ с целью создания армированной структуры.

Необходимость этого обусловлена тем, что фрикционные изделия работают в условиях знакопеременных тепловых нагрузок. Постоянное нагревание и следующее за ним охлаждение ФАПМ, являющихся многокомпонентной композицией, могут вызывать растрескивание материала. Армирование асбестовым волокном, прочность которого достигает $3 \cdot 10^3$ МПа, в значительной степени снижает степень дефектности материала. Асбестовое волокно повышает также механическую прочность при растяжении, изгибе и сжатии материала. Ценным качеством асбеста является его высокая теплоустойчивость. Используемые в последнее время заменители асбеста не могут обеспечить всех перечисленных свойств природного материала.

Мелкодисперсные компоненты вводят для придания материалу таких физико-химических и механических свойств, которые определяют фрикционно-износостойкие характеристики изделия.

Соединенные между собой с помощью **связующего** частицы компонентов и асбестового волокна при последующей термической обработке (вулканизации или бакелизации) образуют монолитный материал со специфическими фрикционными свойствами. Процесс вулканизации каучука в основном осуществляется с помощью серы. В качестве активаторов при-

меняются окислы металлов (цинка, магния, свинца). В качестве стабилизатора каучуков чаще всего применяется неозон Д. Например, для изготовления фрикционного изделия 6КХ-1 используют асбест, каучук СКБ-50СР, серу, каптакс, окись цинка, сурик железный.

Асбофрикционные изделия различают по способу изготовления:

- для тормозных устройств - **формованные** (колодки и накладки), **вальцованные** (лента и накладки), **тканые** (лента и накладки);
- для муфт сцеплений (кольца) - **формованные, тканые, картоно-бакелитовые, картоно-латексные, спиральнонавитые, эллипсонавитые.**

Формованные изделия получают прессованием в пресс-формах специально приготовленной формовочной смеси. Известны формованные материалы на каучуковом, смоляном и комбинированном связующем.

Вальцованные изделия изготавливаются с помощью вальцевания формовочной смеси.

Основу тканых фрикционных изделий составляет асбестовая тканая лента. Она может быть прямой (для тормозных накладок) и обладать некоторой кривизной (для накладок сцепления). Тканые заготовки пропитывают смолами или каучуками, подсушивают, подвергают термообработке.

В основе спирально- и эллипсонавитых накладок лежит асбестовая нить, пропитанная специальным составом, содержащим связующее и наполнители. На специальном станке нить навивается в кольцевые заготовки, которые подвергаются горячему формованию в пресс-формах.

Картоно-латексные изделия изготавливаются из асболатексного картона с последующей термообработкой в печах.

Картоно-бакелитовые изделия производят путем вырубки заготовок из асбестового картона с последующей пропиткой их фенолоформальдегидной смолой и горячим формованием в пресс-формах.

Приготовление асбополимерных смесей состоит из следующих операций: подготовки сырья, собственно приготовления, сушки и измельчения смеси. Обычно сырье поступает в производство в готовом виде, но иногда компоненты требуют специального приготовления. На рис. 9.5 изображена схема технологического процесса производства асбополимерных смесей совмещенным способом. На ней также присутствуют операции подготовки сырья. Существуют клеевой и сухой методы приготовления асбополимерной смеси. На рис. 9.6 изображена схема технологического процесса производства асбополимерных смесей сухим способом. Основ-

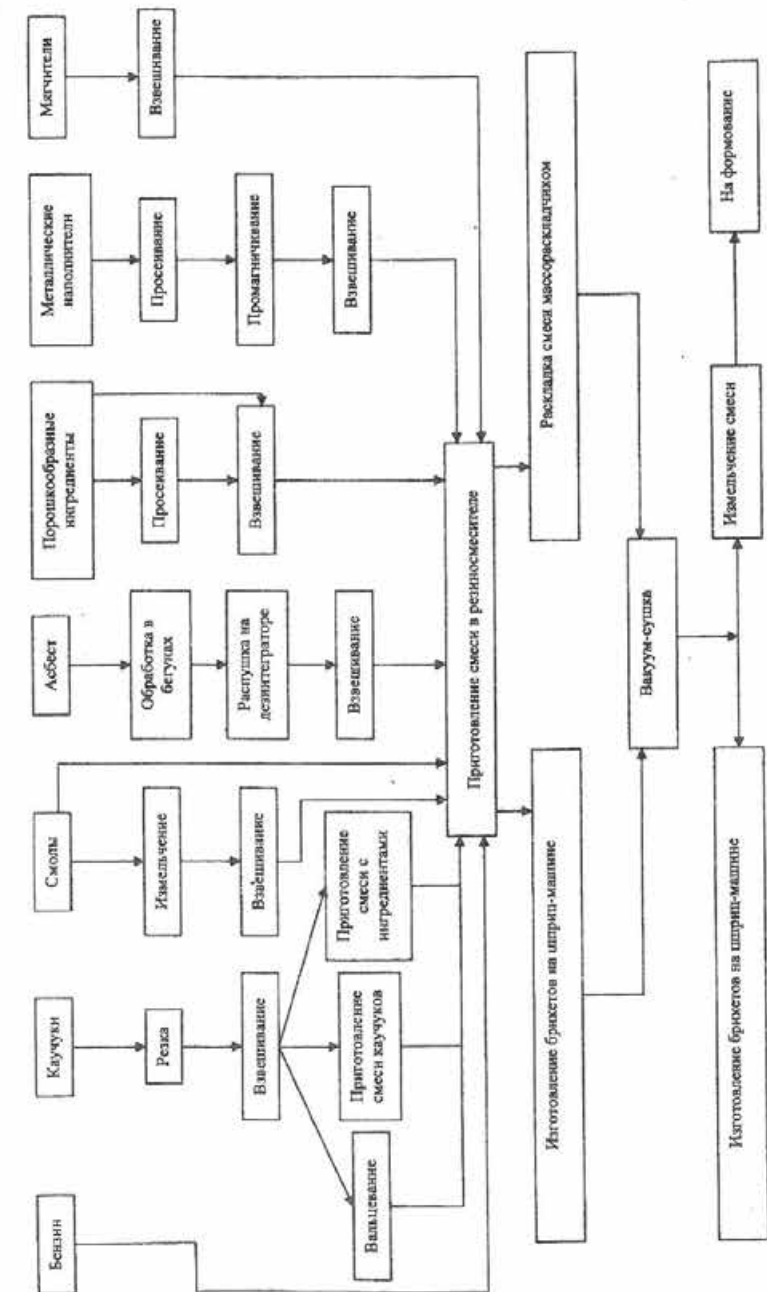


Рис. 9.5. Технологический процесс производства абсополимерных смесей совмещенным способом

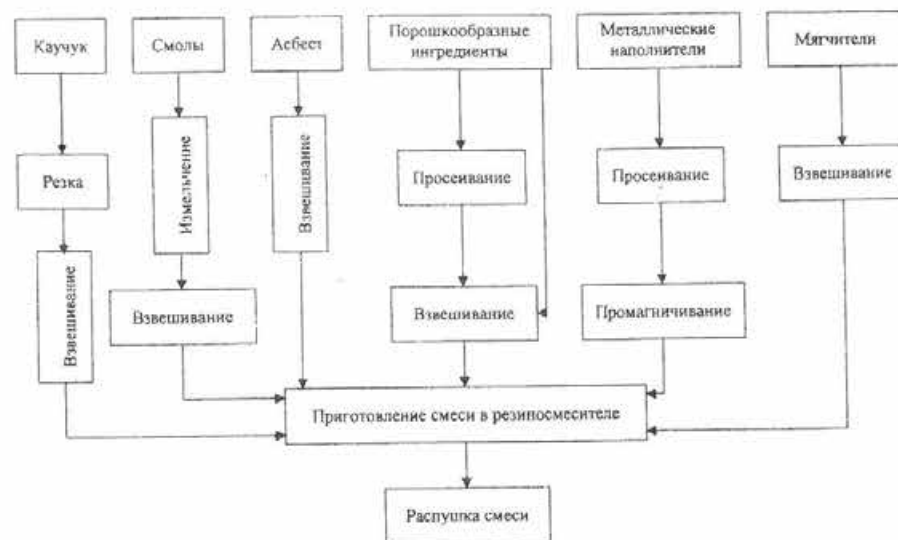


Рис. 9.6. Общая схема технологического процесса производства абсополимерных смесей сухим способом

ным аппаратом для смешивания при этом является резиносмеситель с овальными роторами.

В других схемах применяются смесители с Z-образными роторами, смесители с реверсивным шнеком, вакуум-смесители. Для сушки абсополимерных смесей используются обычно сушильные установки типа сушильных шкафов. Измельчение абсополимерных смесей производится в различных мельницах.

Собственно производство абсофрикционных изделий происходит с помощью формования – брикетирования абсополимерной смеси с ее вулканизацией. Переход асбокаучуковой смеси, находящейся в сыпучем состоянии, в относительно монолитное тело достигается путем уплотнения ее в закрытых пресс-формах или с помощью непрерывного прессования на валковых или червячных машинах. Процесс уплотнения состоит из двух стадий: на первой происходит превращение сыпучего материала в пористый; вторая стадия – процесс превращения пористого тела в монолитное.

В результате полного процесса уплотнения материал приобретает и компрессионные свойства, и вязкопластичные.

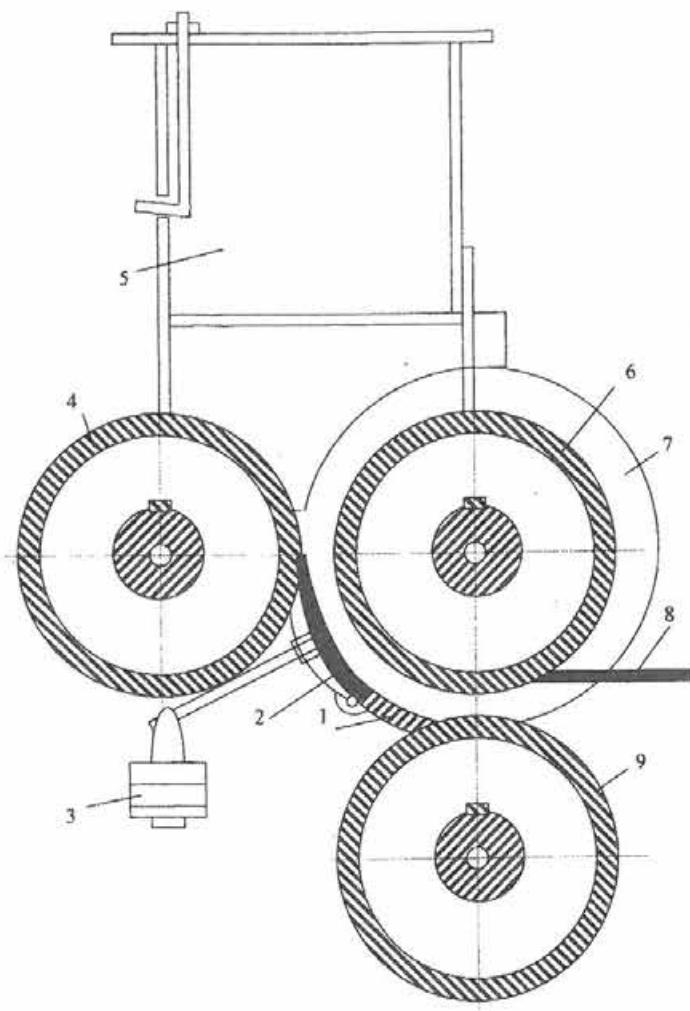


Рис. 9.7. Схема вальцбрикетной машины:
1 – поддон; 2, 8 – шочи; 3 – груз; 4 – валок предварительного формования;
5 – бункер; 6 – верхний валок; 7 – ребра верхнего валка; 9 – нижний валок

Перед прессованием обычно осуществляется процесс брикетирования асбополимерной смеси. Брикетирование необходимо для того, чтобы повысить производительность прессового оборудования при горячем формовании изделий. Это достигается за счет того, что объем брикета в 4–8

раз меньше объема распушенной смеси. Это позволяет значительно уменьшить объем гнезда матрицы пресс-формы, используемой при последующих операциях формования и вулканизации. Для прессования и брикетирования применяются различные прессы, например типа ДБ-2434.

Давление прессования при формовании составляет не ниже 40 МПа. Собственно прессование производится в закрытых пресс-формах.

Процесс уплотнения асбополимерной смеси на вальцовых машинах представлен на рис. 9.7. Исходная сыпучая смесь, подлежащая формованию, засыпается в бункер, дозируется. За счет соприкосновения с вращающимися валками смесь вовлекается в движение, уплотняется и проходит в зазор между валками, оформляясь в ленту, ширина которой определяется расстоянием между ребрами валка, а толщина – величиной зазора между валками. Чтобы достичь заданного уплотнения, обычно предполагается две стадии прохождения материала через валки, которые осуществляются в одном аппарате, например трехвалковой брикетной машине. Существуют также ленточные вальцбрикетные машины и др.

При изготовлении асбофрикционных изделий обязательной является термическая обработка последних (вулканизация). Горячее формование изделий совмещает оба процесса. Однако часть изделий подвергается тепловому воздействию без давления в специальных печах и установках (сушильно-прокалочных агрегатах).

Все асбофрикционные изделия после горячего формования и термической обработки поступают в конечную стадию обработки. Она состоит из следующих операций: резки брикетов, шлифования рабочей поверхности и сверления отверстий.

Для оценки свойств и качества фрикционных изделий определяют следующие виды показателей:

– в лабораторных условиях – упругие свойства (кривая деформации), прочность на растяжение, твердость, стойкость к воздействию удара, тепловые характеристики;

– на инерционном стенде – эффективность торможения, стабильность тормозной эффективности, потери и восстанавливаемость эффективности торможения, износостойкость, состояние поверхности трения.

Кроме того, производятся дорожно-эксплуатационные испытания.

Приготовление паронитовой смеси. Применяются различные способы приготовления паронитовой смеси: с предварительным приготовлением резинового клея; совмещенным способом с предварительным приготовлением резиновой смеси (рис. 9.8). Последний способ нашел широкое применение в промышленности. Первоначально в смеситель загружают каучук, часть порошкообразных ингредиентов, порционно заливается бензин и производится перемешивание. После этого загружаются остальные ингредиенты, в том числе асбест. Ниже приведен режим приготовления резиновой смеси для паронита ПОН в резиносмесителе РС-250-20:

Операция	Время, мин
Загрузка каучука.....	0,5 – 1
Перемешивание под давлением.....	2
Загрузка графита, каолина, сурика, цинковых белил, 50 % технического углерода.....	0,5 – 1
Перемешивание под давлением.....	3
Загрузка 50 % технического углерода, 2-меркаптобензотиазола, тиурама Д.....	0,5 – 1
Перемешивание под давлением.....	4
Выгрузка смеси.....	0,5 – 1

Процесс изготовления **паронитовых листов** осуществляется на специальных паронитовых вальцах с горизонтальным или вертикальным расположением валков. Чаще всего используется вертикальный вариант. Нижний валок, обогреваемый внутри паром, имеет большой диаметр и служит для образования листа паронита. Охлаждаемый водой верхний валок является прессующим. Вначале между валками устанавливается нулевой зазор, и небольшое количество паронитовой смеси создает первый слой наката. Дальнейшее вращение валков при постоянном поступлении смеси приводит к образованию следующих слоев. Для некоторых смесей применяется вальцевание паронита с «рубашкой». Рубашка – начальный слой наката, имеющего лучшую адгезию, чем основная смесь.

Некоторые типы паронитов и вырубленные из них прокладки подвергаются вулканизации. Цель этой операции – повышение стойкости материала к действию агрессивных сред. Вулканизация листов паронита осуществляется в этажных прессах с электрическим или паровым обогревом плит. Вулканизируемые листы паронита прокладываются гладкими

металлическими листами. Кроме того, с этой целью могут использоваться конвейерные, электрические печи и печи аэродинамического подогрева.

Способом вальцевания возможно получать листы паронита толщиной не более 4 мм. Для получения листов большей толщины применяется метод **дублирования паронита**. Процесс дублирования осуществляется методом склеивания двух и более листов с помощью резинового клея на клеопромасочной машине с последующим каландрированием при давлении 12,5 МПа.

У готового паронита контролируются следующие показатели: плотность, прочность на разрыв, увеличение массы в жидких средах, уменьшение массы в кислых средах, сжимаемость и восстанавливаемость, уплотняющая способность, коррозионная активность, устойчивость на изгиб.

Похожая технология отмечается при изготовлении прокладочного материала **БР-1**. Данная технология позволяет снизить пожароопасность процесса и уменьшить количество получаемых отходов по сравнению с процессом изготовления паронитов. Однако в изделии БР-1 используется меньшее количество асбеста, что значительно ухудшает прочность и теплостойкость изделий.

Асбостальные листы. По способу обкладки каркаса асбокаучуковым уплотняющим материалом различают два технологических процесса изготовления асбостальных листов (АСЛ) – с покрытием каркаса асболатексной бумагой; с обкладкой каркаса асбокаучуковой смесью. Основными операциями обоих процессов являются: изготовление уплотнительного материала (бумаги или смеси), перфорация жести (изготовление каркаса), нанесение уплотнительного материала и каландрирование, графитирование, резка на листы заданных размеров, вулканизация листов.

Асбобумагу изготавливают на круглосетчатой бумагоделательной машине из смеси асбеста (70–80 %), наполнителей (8–15 %), латекса ДБП и СКН (8–13 %).

Асбокаучуковая смесь для обкладки каркаса состоит из асбеста (10–40 %), бутадиен-нитрильного латекса (5–10 %), железного сурика (50–80 %), мягчителя и ПАВ (2–7 %), вулканизирующей группы. Смесь приготавливается в лопастных смесителях открытого типа в течение 1,5–2 часов.

Перфокаркас представляет собой тонколистовую с отверстиями сталь, на поверхности которой с обеих сторон имеются заусеницы. В России применяется перфокаркас с отверстиями прямоугольной формы. Перфокаркас в виде непрерывной ленты поступает на обкладочный каландр. Сюда же подается уплотнительный материал (бумага или асбокаучуковая смесь).

Между валками каландра уплотнительный материал наносится на каркас и закрепляется с помощью заусенцев, которые несколько подгибаются, оставаясь полностью в массе уплотнительного материала. При использовании асбобумаги после каландрирования следуют процессы резки на отдельные листы, графитирования, сушки и вулканизации. В состав графитомасляной пасты входят коллоидно-графитовый препарат МС и веретенное масло. Процесс графитирования производится на промазочном станке, вулканизация – в конвейерном сушильно-вулканизационном агрегате.

Технология получения асбостальных листов из асбокаучуковой смеси после каландрирования принципиально не отличается от технологии с использованием асбобумаги. Другим является аппаратное исполнение.

Изготовленные асбостальные листы контролируются на соответствие нормативам по длине и ширине листов, их сжимаемости и восстанавливаемости, стойкости к воздействию ряда жидких сред.

Изготовление асбокартона и картоно-латексных изделий. Эти материалы отличаются по составу, но имеют близкую технологию производства. Асбокартон готовится на основе асбеста и крахмала. При изготовлении картоно-латексных изделий используется многокомпонентная смесь материалов.

В отличие от предыдущих способов изготовление картоно-латексных изделий и асбокартона осуществляется мокрым способом.

Смесь готовится в массных роллах, представляющих собой железобетонную ванну овальной формы с продольной перегородкой. С одной стороны установлен барабан с закрепленными на нем ножами. Волокнистая масса проходит между ножами вращающегося барабана и неподвижными ножами. При этом происходит расщепление асбеста и смешивание его со связующим и другими компонентами. Например, латекс коагулирует и осажается на волокне. При изготовлении асболатексного картона смесь состоит из асбеста 4-го сорта, крошки (отходов), латекса, серы и окиси цинка. Разбавление смеси осуществляют суспензией, подаваемой из очистных сооружений, т. е. оборотной водой, которая передается с операций изготовления картона на очистку от взвешенных частиц сырья, которыми является в основном тонкодисперсная фракция асбеста. Из этого следует, что четвертый сорт асбеста, используемый для производства картона, должен отличаться от четвертого сорта асбеста, используемого при изготовлении фрикционных и прокладочных материалов более низкой величиной содержания тонкодисперсной фракции.

Далее готовая смесь поступает в мешальный бассейн – железобетонную цилиндрическую емкость с мешалкой. Из бассейна смесь с помощью поршневого насоса передается в переливной ящик, где разбавляется оборотной водой. Затем пульпа через песочницу для очистки от посторонних примесей поступает на операцию изготовления картона, которая осуществляется на картоноделательной двухцилиндровой машине, подобной листоформовочной машине, используемой при изготовлении асбестоцементных изделий.

Картон, снятый с машины, с целью удаления влаги подвергается прессованию. Перед вырубкой заготовок картон выдерживается не менее двух суток. Далее производится сушка заготовок в сушильно-прокалочных агрегатах обычно совместно с вулканизацией. После вулканизации заготовки разрезаются на отдельные накладки и подвергаются механической обработке. Контроль за качеством изделия производится по тем же параметрам, что и для фрикционных накладок.

9.5. Резюме

1. Основным потребителем асбеста является асбестоцементная промышленность. Производство асбестоцемента по традиционной технологии складывается из таких основных процессов, как:

- распушка асбестового волокна;
- приготовление асбестоцементных суспензий;
- фильтрация суспензий;
- обезвоживание и уплотнение отфильтрованных слоев (паст);
- профилирование свежесформованного полуфабриката (трубы или листа);
- твердение полуфабриката.

Содержание тонкодисперсной фракции в асбестовом волокне имеет важное значение для ведения технологического процесса приготовления асбестоцемента и качества конечных изделий.

2. На предприятиях асбестотехнической промышленности (АТИ) производят широкий ассортимент асбестотехнических изделий, основными из которых являются асбестовые ткани, асбестовые фрикционные изделия, прокладочные материалы.

3. При изготовлении асботканей используются прядильная, композиционная и адсорбционная способности асбеста. Основными показателями качества текстильного асбеста являются: длина, однородность по дли-

не, отсутствие посторонних примесей (гали, магнетита, мусора), равномерная и оптимальная степень распушки волокна. Особенным показателем для асбестовых тканей является показатель потерь при прокаливании.

4. Технология производства асбофрикционных изделий весьма разнообразна. Наибольшее распространение получили фрикционные асбополимерные материалы (ФАПМ). Асбофрикционные изделия различают по способу изготовления, основным является способ формования.

Известны формованные материалы на каучуковом, смоляном и комбинированном связующем.

5. Технологический процесс изготовления паронитов и некоторых других прокладочных материалов состоит из следующих основных операций: подготовки сырья, приготовления смеси, изготовления листов, вулканизации листов и дублирования листов.

6. Немаловажную роль для качества фрикционных изделий и паронита играет фракционный состав асбеста. Основными показателями при этом являются пыль ($-0,4$ мм) и содержание длинных волокон – более 10 мм. Содержание тонкодисперсной фракции для изготовления паронитов является второстепенным показателем. Исключение составляет процесс производства асбокартона мокрым способом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Хризотил-асбест – уникальный минерал и уникальный материал для потребления. Волокнистая структура хризотил-асбеста определяет его основные свойства: низкую электропроводность и теплопроводность, высокую механическую прочность, эластичность, стойкость к воздействию высоких температур и различных агрессивных сред.

Хризотил-асбест является магниальным гидросиликатом и имеет трубчатое строение волокон-фибрилл.

Основные месторождения хризотил-асбеста расположены в России, Канаде, Бразилии, Зимбабве, Китае, Казахстане.

Методом обогащения асбеста является сухой гравитационный метод, основанный на принципе отсасывания асбестового волокна из дробленой руды.

Анализ методов оценки качества асбестового волокна в исходной руде, готовой продукции и в условиях потребителей показал, что наиболее важными показателями являются:

- содержание тонкодисперсной фракции менее 0,075 мм;
- природная прочность асбеста.

Комплексным показателем оценки качества хризотил-асбеста является FSU – единый показатель прочности асбестового волокна (технологическая ценность).

В книге впервые приводятся данные изучения процесса адсорбции тонкодисперсной фракции на асбестовом волокне.

Образование тонкодисперсной фракции на асбестовом волокне зависит от природных свойств асбестового волокна и вмещающей породы, а именно от их поверхностных электрических свойств.

Тонкодисперсная фракция состоит из 80 % породных микрочастиц и 20 % микроволокна. Адсорбция микрочастиц породы на технологическом волокне происходит при соприкосновении свежерасколотой поверхности микрочастицы породы с волокном и без разрушения зерен вмещающей породы малоэффективна.

Знание принципов адсорбции тонкодисперсной фракции на асбестовом волокне позволяет разрабатывать, совершенствовать, обосновывать и классифицировать методы снижения ее содержания в процессе обогащения асбеста.

На практике применяются воздушные методы снижения содержания тонкодисперсной фракции.

Основными аппаратами для реализации воздушного метода снижения содержания тонкодисперсной фракции в асбесте являются различные виды барабанных классификаторов.

Воздушный метод снижения содержания тонкодисперсной фракции в условиях асбестообогащительных фабрик реализуется по таким схемам, как:

- установка барабанных классификаторов в голове или в конце пересчетного потока;
- введение наддува рабочего пространства барабанного классификатора;
- аэродинамическая сепарация в воздуховодах и др.

Изучение процесса адсорбции тонкодисперсной фракции на асбестовом волокне позволило выделить отдельную группу методов снижения тонкодисперсной фракции. Данные методы направлены на то, чтобы в процессе технологической переработки асбестовой руды исключить из процесса такие операции и аппараты, в которых происходит наибольшее насыщение волокна тонкодисперсной фракцией. Данные методы названы методами «ненасыщения» асбеста тонкодисперсной фракцией.

Методами «ненасыщения» асбеста тонкодисперсной фракцией являются крупные схемные решения. К данным методам относятся: предварительная классификация руды на просевную и надрешетную, термоаэроклассификация, магнитная сепарация и др. Методы «ненасыщения» асбеста тонкодисперсной фракцией значительно эффективнее, чем воздушные методы. Снижение содержания тонкодисперсной фракции в готовом асбесте происходит до 12–20 %, в то время как воздушными методами достигается уровень 35–40 %.

Мокрое гравитационное обогащение асбеста применяется для приготовления специальных видов асбеста, требующих высокой степени очистки асбестового волокна от примесей, а также от тонкодисперсной фракции.

Важную роль для обеспечения качества асбеста готовых групп имеют технологические методы управления качеством, используемые на практике.

К технологическим принципам управления относятся такие систематизированные приемы регулирования качества готовой продукции, которые позволяют с помощью технологических средств достигать заданного качества готовой продукции в заданное время.

Одним из показателей для правления качеством асбеста является степень инерционности процессов обогащения – обогащительных объектов.

Российская практика позволяет получать асбест готовых групп требуемого потребителями качества и оперативно менять марочность продук-

ции, используя различные методы технологического управления процессом: изменение производительности, перераспределение продуктов, изменение режимов работы обогащительных аппаратов и размеров сит на них.

Управление качеством готовой продукции за рубежом осуществляется путем автоматического включения в работу в пересчетных линиях дополнительных обогащительных аппаратов и изменения дозируемого количества различных видов асбестового волокна с помощью автоматического управления процессами дозирования и смешивания асбеста узких классов крупности.

Сфера потребления хризотил-асбеста обусловлена его свойствами.

Основными потребителями асбеста являются асбестоцементная и асбестотехническая промышленности.

Качество асбеста, в том числе и содержание тонкодисперсной фракции, имеет важное значение для ведения технологического процесса приготовления асбестоцемента и качества конечных изделий.

На асбестотехнических предприятиях производят широкий ассортимент изделий, основными из которых являются асбестовые ткани, асбестовые фрикционные изделия, прокладочные материалы.

При изготовлении асботканей используются прядильная, композиционная и адсорбционная способности асбеста.

Качество асбеста оказывает огромное влияние как на качество асботканей, так и на технологичность всего производственного процесса. Основными показателями текстильного асбеста являются: длина, однородность по длине, отсутствие посторонних примесей (гали, магнетита, мусора), равномерная и оптимальная степень распушки волокна. Особенным показателем для асбестовых тканей является показатель потерь при прокаливании.

Технология производства асбофрикционных и прокладочных изделий весьма разнообразна. В одних случаях она сходна с технологией производства пластмасс или резинотехнических изделий, в других – является родственной технологии текстильного производства и изготовления бумаги и картона. Наибольшее распространение получили фрикционные асбополимерные материалы (ФАПМ).

Немаловажную роль для качества фрикционных изделий и паронита играет фракционный состав асбеста. Основными показателями при этом являются пыль ($-0,4$ мм) и содержание длинных волокон (более 10 мм). Содержание тонкодисперсной фракции для изготовления фрикционных изделий и паронитов является второстепенным показателем. Причина та-

кого явления заключается в том, что изготовление перечисленных изделий производится сухим способом без привлечения воды, способной вымывать тонкодисперсную фракцию.

В свете всего изложенного в настоящей книге дан новый подход к проблемам качества готовой продукции. Особенности данного подхода являются следующие принципы:

– подход к качеству с позиций изучения физико-химических явлений технологических объектов и частиц в процессе обогащения;

– использование природных свойств минерала при изучении проблем качества;

– подход к проблемам качества как к совершенствованию технологических и схемных решений;

– классификация методов улучшения качества готовой продукции;

– учет технологии ведения процесса у потребителей и требований к качеству конечных изделий.

Использование такого подхода позволит технологам–практикам принимать правильные оперативные и перспективные решения относительно качества готовой продукции и ведения технологии обогащения асбеста и отчасти других полезных ископаемых.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Практика обогащения асбестовых руд* / Под редакцией Ф. П. Софронова. М.: Недра, 1975.
2. *Золов К. К., Попов Б. А.* Баженовское месторождение хризотил-асбеста. М.: Недра, 1985.
3. *Малеев М. Н.* Свойства и генезис природных нитевидных кристаллов и их агрегатов. М.: Недра, 1971. 200 с.
4. *Башта К. Г.* Условия формирования жил и месторождений хризотил-асбеста // Геология и разработка месторождений хризотил-асбеста.: Научные труды. Вып. 26 / ВНИИпроектасбест. Асбест, 1982. С. 14–36.
5. *Соболев Н. Д.* Вопросы серпентинизации и асбестизации // Сов. геология. 1975. № 3. С. 64–72.
6. *Перлин В. Д.* Структура, свойства и применение хризотил-асбеста в асбесто-цементной промышленности // Итоги науки и техники. Сер.: Неметаллические полезные ископаемые. 1973. Т 2. С. 74–127.
7. *Соболева М. В.* Минералогия волокнистых минералов группы амфиболов и серпентина. М.: Недра, 1972.
8. *Зырянов В. А.* Геологическое строение и асбестоносность западной полосы Баженовского месторождения хризотил-асбеста: Автореф. дис. ... геол.-минерал... наук. Л.: ВСЕГЕИ, 1981.
9. *Огнев А. С.* Влияние выветривания на свойства хризотил-асбеста. Свердловск: Средне-Уральское книжное издательство, 1973. 147 с.
10. *Башта К. Г., Гурьев С. А.* О возможности определения качества хризотил-асбеста методом крутильных колебаний // Добыча и обогащение асбестовых руд: Научные труды. Вып. 23 / ВНИИпроектасбест. Асбест, 1981. С. 3–6.
11. *Щедринский М. Б., Волегов А. В., Мюллер Э. К.* Обогащение асбестовых руд. М.: Госгортехиздат, 1962.
12. *Жуковский Г. В.* Установление рационального режима отсасывания асбестового волокна: Дис. / СГИ. Свердловск, 1942. 258 с.
13. *Шалюгина В. А., Бергер Г. С.* Исследование скорости витания волокна антофиллит-асбеста в воздушной среде // Новые достижения в технологии обогащения: Научные труды. Вып. 13 / ВНИИпроектасбест. Асбест, 1972. С. 122–130.
14. *Дябин Н. В., Смирнова Л. Я.* Грохот инерционного действия: Научные труды. Вып. 13 / ВНИИпроектасбест. Асбест, 1973. С. 33–44.
15. *Смирнова Л. Я.* Узкая шкала классификации в рудном потоке: Научные труды. Вып. 12 / ВНИИпроектасбест. Асбест, 1972. С. 43–48.

16. *Топорков В. И., Дябин. Н. В.* Отчет о командировке в Канаду / ВНИИ-проектасбест. Асбест, 1972.

17. *Методика определения содержания хризотил-асбеста* / НИИпроектасбест. Асбест, 2002.

18. *Шалюгина В. А.* Расчетный метод определения содержания асбеста в руде: Отчет по НИР / ВНИИпроектасбест. Асбест, 2001.

19. *ГОСТ-12871-93.* Асбест хризотилковый. Общие технические условия / Межгосударственный совет по стандартизации и сертификации. Минск, 1993.

20. *ГОСТ 25984.1-83 – ГОСТ 25984.5-83.* Асбест хризотилковый. Методы испытаний / Государственный комитет СССР по стандартам. М., 1983.

21. *ГОСТ 16504-81.* Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения / Государственный комитет СССР по стандартам. М., 1981.

22. *ТУ-5721-10-0284351-2000.* Асбест хризотилковый 3, 4, 5 и 6 групп ОАО «Ураласбест» и ОАО «Оренбургасбест», технические условия.

23. *ГОСТ 25984.6-99.* Асбест хризотилковый. Метод определения фракционного состава на гидроклассификаторе типа «Бауэр-Мак-Нетт». Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. Минск, 1999.

24. *ТУ 5721-01-0281476-2000.* Асбест хризотилковый ОАО «Ураласбест», поставляемый на экспорт. Технические условия. Екатеринбург, 2000.

25. *ТУ-572102-0281477-2001.* Специальные марки асбеста. Екатеринбург, 2001.

26. *Методика по определению фракций асбеста на гидроклассификаторе «Бауэр-Мак-Нетт».* Квебек, Канада: Институт асбеста, 1972.

27. *Методика по определению фракций асбеста на квебекском контрольном аппарате.* Квебек, Канада: Институт асбеста, 1966.

28. *ТУ 5781-042-04812290-93.* Листы асбестоцементные волнистые. Технические условия.

29. *Беркович Т. М.* Основы технологии асбестоцемента. М.: Стройиздат, 1979.

30. *John E. Willden.* A Guide to the Art of Asbestos Cement. Winchester, Hampshire, England, 1986.

31. *Методика по определению фракций асбеста на гидроклассификаторе «Тернер-Ньюол».* Квебек, Канада: Институт асбеста, 1972.

32. *Методика определения качества асбеста фирмой VOITH (Австрия).* Вена: J.M.VOITH AG, 1993.

33. *Огнев А. С.* Влияние выветривания на свойства хризотил-асбеста. Свердловск: Средне-Уральское книжное издательство, 1973. 147 с.

34. *Методика определения показателя FSU.* Квебек, Канада: Институт асбеста, 1982.

35. *Беркович Т. М., Бирюков А. И.* Производство асбестоцементных изделий с использованием асбеста Джетыгаринского месторождения // Строительные материалы. 1969. № 6.

36. *Берней И. И.* Технология асбестоцементных изделий. М.: Недра, 1977.

37. *Берней И. И.* Основы теории формования асбестоцементных изделий // Строительные материалы. М., 1969.

38. *Погадаева Т. М., Ахмедьянова Т. А., Мотовилова Л. А.* О единстве измерений при анализе проб руды хризотил-асбеста // Технология обогащения асбестовых руд: Научные труды. Вып. 26 / ВНИИпроектасбест. Асбест, 1985. С. 3–11.

39. *Михайлищева Т. А.* Исследования и разработка методов определения качества товарного асбеста хризотилового: Дис. ... канд. техн. наук. М., 1968.

40. *Знаменский В. В.* Экспериментально-теоретические исследования с целью выработки технических решений, обеспечивающих снижение содержания класса – 0,14 мм в товарной продукции фабрики № 6 комбината «Ураласбест», и разработки обезгаливающего оборудования повышенной эффективности: Научно-технический отчет. Асбест, 1996.

41. *Ефимов В. И.* Минеральный состав природных типов руд Баженовского месторождения и качество товарного хризотил-асбеста по содержанию фракции – 0,14 мм // Уральский геологический журнал. № 6 (30). Екатеринбург, 2002. С. 131–138.

42. *Abramson H. A.* Elektrophoresis of proteins. London, 1942.

43. *Shmid G., Shwartz H. Z.* Elektrochem, № 4, Berlin, 1951, p. 243–259.

44. *Жуков И. И.* Коллоидная химия. Т. 1. М.: Химия, 1949.

45. *Григоров О. Н., Козьмина З. П., Маркович А. В., Фридрихсберг Д. А.* Электрокинетические свойства капиллярных систем. М.: Изд. АН СССР, 1956.

46. *Грачева О. И., Епинатьева В. И.* Электрокинетические свойства хризотил-асбеста различных месторождений СССР // Труды института «НИИАсбестцемент». Вып. 26. М., 1971.

47. *Hodson A. A.* Fibrous silicates., London, 1965.

48. *Руководство к практическим работам по коллоидной химии* / Григоров О. Н., Карпова И. Ф., Козьмина З. П., Тихомолова К. П., Фридрихсберг Д. А., Чернобережский Ю. М. М.; Л.: Химия, 1964. С. 176–232.

49. *Казарович Л. Т.* Анализ показателей качества уральского асбеста с целью оценки его соответствия стандартам и конкурентоспособности на мировом рынке: Отчет по НИР / НИИпроектасбест. Асбест, 1999.

50. Яснев В. С., Пшеницына Е. В., Шарафутдинова З. М. Усовершенствование технологии обогащения асбестовых руд на фабрике № 6, обеспечивающей повышение производства асбеста, увеличение выработки шебня и улучшение технологических показателей обогащения: Отчет по НИР / ВНИИпроектасбест. Асбест, 1987.

51. Фоминых Л. Ф., Бердяев В. Ф., Савина С. Ф. Интенсификация процесса грохочения на барабанных грохотах // Совершенствование технологии обогащения асбестовых руд: Научные труды, вып. 22 / ВНИИпроектасбест. Асбест, 1984. С. 80–94.

52. Цытин Е. Ф., Морозов Ю. П., Козин В. З. Моделирование обогатительных процессов и схем. Екатеринбург: Изд-во Уральского государственного университета, 1996. С. 160–173.

53. Знаменский В. З. Экспериментально-теоретические исследования эффективности работы устройств, предназначенных для снижения содержания класса – 0,14 в товарной продукции фабрики № 6: Научно-технический отчет. Асбест, 1995.

54. Знаменский В. В. Экспериментальные исследования на специализированных стендах с целью отработки системы наддува барабанных классификаторов и обезгаливателя отбойного типа: Научно-технический отчет. Асбест, 1997.

55. Знаменский В. В. Экспериментальные исследования на специализированных стендах с целью отработки системы наддува барабанных классификаторов и обезгаливателя отбойного типа: Научно-технический отчет. Асбест, 1998.

56. Цытин Е. Ф., Потанов В. Я., Пелевин А. Е., Бердяев В. Ф., Грибова И. Г. Изучение эффективности элементарных процессов при классификации асбеста // Совершенствование технологии обогащения асбестовых руд: Научные труды, вып. 31 / ВНИИпроектасбест. Асбест, 1990. С. 89–100.

57. Шалюгина В. А., Сычева А. И., Николаева Т. А. Разработать и внедрить технологию обогащения асбестовых руд, обеспечивающую повышение производства асбеста, сохранение природной длины волокна, увеличение глубины обогащения: Отчет / ВНИИпроектасбест. Асбест, 1983.

58. Иванов В. В., Булатова З. П. Отчет о командировке на Жилевскую опытно-промышленную обогатительную фабрику (ОПОФ) Института обогащения твердых горючих ископаемых (ИОТТ) / ВНИИпроектасбест. Асбест, 1986.

59. Яснев В. С., Ионов К. А. Исследования модернизированной шахтной сушилки с целью повышения извлечения асбеста в черновой концентрат и снижения удельных топливо-энергетических затрат: Отчет / НИИпроектасбест. Асбест, 2002.

60. Ионов К. А. Исследования по совершенствованию технологии обработки черновых концентратов сушки ДСК–1 для получения асбеста с улучшенным фракционным составом с учетом повышения их выхода: Отчет / НИИпроектасбест. Асбест, 2002.

61. Martinez I. Selection of asbestos fiber. Pat USA, № 328233. 1967.

62. Asbestos corporation LTD. Magnetik selection of asbestos. Pat Franch. № 1 526 325.1968.

63. Martinez I. Selection of asbestos fiber. Pat USA, № 3 493 108. 1970.

64. Газалеева Г. И., Ершова Г. П. Исследование технологических свойств асбестовых руд Молодежного месторождения: Отчет № 3639, т. 7 / ВНИИпроектасбест. Асбест, 1987.

65. Газалеева Г. И., Ершова Г. П. Исследование технологических свойств асбестовых руд Молодежного месторождения: Отчет № 3639, т. 8 / ВНИИпроектасбест. Асбест, 1987.

66. Газалеева Г. И. Математическое описание процесса сухой магнитной сепарации асбестовой руды // Технология обогащения асбестовых руд: Научные труды. Вып. 23 / ВНИИпроектасбест. Асбест, 1985. С. 83–89.

67. Газалеева Г. И., Ершова Г. П., Потанов В. Д., Бикбов А. А. Способ переработки руды: А. с. № 1155294.

68. Газалеева Г. И., Потанов В. Д. Исследование технологических свойств руды Молодежного месторождения. Разработка методов снижения магнетита в сортовом асбесте // Совершенствование технологии обогащения асбестовых руд: Научные труды. Вып. 22 / ВНИИпроектасбест. Асбест, 1984.

69. Маркелов В. М. Коэффициент равнопадаемости породных частиц и асбестовых волокон в водной среде // Новые достижения в технологии обогащения асбестовых руд: Научные труды. Вып. 12 / ВНИИпроектасбест. Асбест, 1972. С. 25–28.

70. Поваров А. И. Гидроциклоны. М.: Госгортехиздат, 1961.

71. Гольдин Е. М., Поваров А. И. О гидродинамической картине потока и вычисления крупности разделения в гидроциклоне // Труды Механобра. Вып. 130. Л., 1961.

72. Маркелов В. М., Бергер Г. С. Исследование конечных скоростей падения минеральных зерен цилиндрической формы в жидкой среде // Добыча и обогащение асбестовых руд: Научные труды. Вып. 11 / ВНИИпроектасбест. Асбест, 1971. С. 119–131.

73. Клячин В. В. Некоторые закономерности процесса разделения по крупности каолина в гидроциклоне // Труды Гипрометаллоруд, вып. 1. Л., 1955.

74. Газалеева Г. И., Маркелов В. М. Анализ существующих формул и методов для определения скоростей падения цилиндрических частиц в жидкой среде // Исследования в области техники и технологии обогащения асбестовых руд: Научные труды. Вып. 24 / ВНИИпроектасбест. Асбест, 1982. С. 7–25.

75. Тихонов О. Н., Газалеева Г. И. Особенности управления технологическими процессами на асбестообогатительных фабриках // Обогащение руд. № 4. СПб, 2002. С. 36–40.

76. Комплект технологической документации. Асбестообогатительная фабрика, производства 1 и 2 / ОАО «Ураласбест». Асбест, 2000.

77. Титаренко П. Я., Кораблев И. Х., Трапезников А. В. Отчет о поездке в Италию группы советских специалистов асбестовой промышленности. Москва – Асбест, 1976.

78. Титаренко П. Я., Фокеев Ю. П., Корепин Н. И. и др. Отчет о поездке в Канаду группы специалистов асбестовой промышленности СССР с целью ознакомления с опытом добычи и обогащения асбеста / МПСМ СССР; Главасбест. Москва – Асбест, 1968.

79. Фокеев Ю. П., Земсков П. Я. и др. Отчет о поездке в Канаду группы советских специалистов асбестовой промышленности с целью ознакомления с опытом технологии и организации добычи и обогащения асбеста / МПСМ СССР; Главасбест. Москва – Асбест, 1977.

80. Ураласбест. События и люди (1922–2002) / Под общей редакцией Л. М. Ременника. Екатеринбург: Средне-Уральское книжное издательство, 2003.

81. Соколов П. Н. Производство асбестоцементных изделий. М.: Недра, 1968.

82. Поярко А. С. Прядение и ткачество асбестового волокна. М.: Легкая индустрия, 1971. 383 с.

83. Шанин Н. П., Бородулин М. М., Колбовский Ю. Я. Производство асбестовых технических изделий. Л.: Химия, Ленингр. отд., 1983. 239 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
1. ПРИРОДНЫЕ СВОЙСТВА ХРИЗОТИЛ-АСБЕСТА	4
1.1. Генезис и месторождения	5
1.2. Химический состав и структура	6
1.3. Методы определения природных свойств	8
1.4. Физико-химические показатели хризотил-асбеста	9
1.5. Резюме	13
2. ТЕХНОЛОГИЯ ОБОГАЩЕНИЯ АСБЕСТОВЫХ РУД	13
2.1. Метод обогащения асбеста	14
2.2. Асбестообогатительные фабрики	16
2.3. Дробильно-сортировочный комплекс (ДСК)	18
2.4. Рудный поток	22
2.5. Перечистный поток	28
2.6. Резюме	31
3. КАЧЕСТВО АСБЕСТА И МЕТОДЫ ЕГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ	32
3.1. Методы определения качества асбестовой руды	33
3.2. Методы определения качества асбеста у производителей	36
3.3. Потребительские критерии оценки качества асбеста	40
3.4. Резюме	46
4. АДСОРБЦИЯ ТОНКОДИСПЕРСНОЙ ФРАКЦИИ НА АСБЕСТОВОМ ВОЛОКНЕ	46
4.1. Состав и размеры тонкодисперсной фракции	47
4.2. Поверхностные свойства минеральных частиц при обогащении асбеста	51
4.3. Транспортирование и перемешивание асбестового волокна и вмещающей породы	57
4.4. Резюме	59
5. ВОЗДУШНЫЕ МЕТОДЫ СНИЖЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ТОНКОДИСПЕРСНОЙ ФРАКЦИИ В АСБЕСТЕ	60
5.1. Конструктивные и технологические особенности барабанного классификатора БК-1	61
5.2. Динамика процесса разделения асбеста в барабанном классификаторе	62
5.3. Практика снижения содержания тонкодисперсной фракции воздушным методом	66
5.4. Резюме	73
6. «НЕНАСЫЩЕНИЕ» АСБЕСТА ТОНКОДИСПЕРСНОЙ ФРАКЦИЕЙ: МЕТОДЫ И СХЕМЫ	73
6.1. Раздельная обработка просевных и надрешетных продуктов грохотов после ДСК	74

6.2.	Предварительное обогащение асбеста в процессе сушки – термоаэроклассификация	76
6.3.	Схемы обработки черновых концентратов сушки	78
6.4.	Магнитная сепарация крупных фракций	81
6.5.	Резюме	92
7.	МОКРОЕ ГРАВИТАЦИОННОЕ ОБОГАЩЕНИЕ АСБЕСТА В ГИДРОЦИКЛОНАХ	93
7.1.	Граничная крупность разделения	93
7.2.	Технология мокрого обогащения асбеста	97
7.3.	Резюме	100
8.	ПРИНЦИПЫ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ГОТОВОЙ ПРОДУКЦИИ	101
8.1.	Метод выбора параметра управления по степени инерционности процесса	102
8.2.	Практика управления качеством готовой продукции на российских предприятиях	105
8.3.	Управление качеством готовой продукции путем смешивания узких классов – зарубежная практика	108
8.4.	Резюме	112
9.	ПОТРЕБИТЕЛИ АСБЕСТА	113
9.1.	Производство асбестоцемента	114
9.2.	Производство асбестовых тканей	123
9.3.	Производство асбофрикционных изделий	127
9.4.	Производство прокладочных материалов	134
9.5.	Резюме	139
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	141
	БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	145

Научное издание

Галина Ивановна Газалева,
канд. техн. наук

Методы улучшения качества асбеста

Редактор издательства *Л. В. Устьянцева*
Компьютерная верстка *Н. Л. Кузиной*
Дизайн обложки *И. П. Сильченко*

Подписано в печать 31.01.2005. Формат 60 × 84 1/16. Бумага типографская.
Гарнитура Times New Roman. Печать на ризографе. Печ. л. 9,625. Уч.-изд. л. 11,0.
Тираж 220.

Издательство УГГУ
620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30
Уральский государственный горный университет

Отпечатано с оригинал-макета в лаборатории
множительной техники издательства УГГУ